

POUR LA

SCIENCE

JUIN 1980
MENSUEL N° 32 18 F

édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

BELGIQUE : 130 FB SUISSSE : 7,50 FS CANADA : \$ 3,50 (14321) — ISSN 0153-4092 — N° 32 JUIN 1980



L'écologie des Coyotes

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

GAUTHIER - VILLARS

...parce que l'écologie est une science



A PARAÎTRE

R. CHAUSSAT
**La multiplication végétative
des plantes supérieures.**
B. MONTIES
Polymères végétaux

J. ARRIGNON
**Aménagement écologique
et piscicole des eaux douces**
C. COSTES et coll.
**Photosynthèse et production
végétale**
R. DAJOZ
Écologie des insectes forestiers
R. DAJOZ
Précis d'écologie
J.-P. EHRHARDT, G. SEGUIN
Le plancton
E.B. FORD
Génétique écologique

M. GILLET
**Biologie des graminées
fourragères.**

C. JACQUIOT
**Écologie des champignons
forestiers**

Y. LEROY
L'univers sonore animal

J.-M. PÉRÈS et coll.
La pollution des eaux marines

P. PESSON
Actualités d'écologie forestière
Sol, flore, faune.

P. PESSON et coll.
**La pollution des eaux
continentales**

P. PESSON, G. BIRKAN et coll.
**Écologie du petit gibier et
aménagement des chasses**

P. PESSON et coll.
**Pesticides et gibier, maladies
du gibier**

P. PESSON et coll.
Écologie forestière

gauthier-villars

ARTICLES

14 **LA GUERRE CHIMIQUE ET LE DÉSARMEMENT**

Si les négociations en cours à Genève n'aboutissent pas à faire interdire le développement, la production et le stockage des armes chimiques, il faut craindre une phase nouvelle et particulièrement dangereuse de la course aux armements.

26 **LA MORT SUBITE DU NOURRISSON**

Un nourrisson apparemment en bonne santé meurt de façon tout à fait inattendue : ce drame est longtemps resté mystérieux et incompréhensible. De nouvelles données indiquent que, dans la majorité des cas, il s'agit d'anomalies du contrôle de la respiration.

34 **UN CAMPEMENT PALÉOLITHIQUE EN BELGIQUE**

L'analyse de fragments de pierres retrouvés dans les sables permet de reconstituer des activités humaines datant de 9 000 ans. L'une des méthodes d'analyse consiste à remonter les outils de silex sur le bloc dont ils furent détachés.

46 **L'ÉCOLOGIE SOCIALE DES COYOTES**

Leur mode de vie, en solitaire ou en bandes, dépend, semble-t-il, de la nature de leur alimentation. L'observation du comportement de ces animaux conduit à s'interroger sur les dangers réels qu'ils représentent pour le bétail.

56 **LES NOUVELLES FRONTIÈRES DE LA RECHERCHE CANCÉROLOGIQUE**

Les moyens utilisés pour lutter contre les cancers sont multipliés grâce aux progrès de la chimie thérapeutique et de la pharmacologie. Cette lutte, thérapeutique et préventive, devrait être aidée par les récentes découvertes sur les relations, relevant de l'immunité et d'autres mécanismes d'homéostasie cellulaire, entre les organismes et les cellules cancéreuses.

68 **LES VERRES MÉTALLIQUES**

Bien que leur composition soit celle d'un métal, leur structure atomique non cristalline est celle du verre. On peut fabriquer de tels matériaux en refroidissant un alliage en fusion à une vitesse d'un million de degrés par seconde.

82 **DES BACTÉRIES RECOMBINANTES POUR FABRIQUER DES PROTÉINES UTILES**

Les bactéries dans lesquelles on introduit des gènes non bactériens peuvent fabriquer des protéines non bactériennes. Parmi les protéines synthétisées par recombinaison génétique figurent l'insuline et l'interféron.

96 **LA STRUCTURE PRIMITIVE DE L'UNIVERS**

La structure à grande échelle de l'Univers actuel est régulière à un millième près. Certaines observations montrent qu'il en était déjà de même 10^{-35} seconde après le « big bang ».

RUBRIQUES

- 6 IL Y A 50 & 100 ANS
- 8 SCIENCE & SOCIÉTÉ
- 108 JEUX MATHÉMATIQUES
- 114 EXPÉRIENCES D'AMATEUR
- 122 LIVRES
- 125 AUTEURS
- 126 BIBLIOGRAPHIE

Nos lecteurs trouveront en pages 39, 40 89 et 90 des bulletins d'abonnement.



COUVERTURE

Cette peinture montre un coyote (*Canis latrans*) porteur des équipements permettant d'étudier son comportement (voir *L'écologie sociale des coyotes*, par Marc Beckoff et Michael Wells, page 46). Même lorsque le coyote ne peut plus être identifié visuellement au moyen des barrettes de couleur placées sur ses oreilles, ses mouvements sont suivis grâce au collier émetteur fixé autour de son cou. Le coyote est un animal typiquement américain que l'on retrouve dans diverses régions du Canada, des États-Unis et d'Amérique centrale. Les études radio-téléométriques sont très utiles pour étudier les déplacements d'animaux sauvages, vivant seuls ou en bande.

Références des illustrations

Il y a
50 et 100 ans
p. 7

Musée de la Marine

Science
et société

p. 8 Jean-Claude Venet
p. 9 Ardex
p. 10 D'après P. Kalliomaki
et P. Karp et al.
p. 13 Jean-Louis Schulman

La guerre
chimique et le
désarmement

p. 14 et 15 Frank R. Porschatis,
The Salt Lake Tribune
p. 16 à 18, Adolph E. Brotman
p. 20 et 21 U.S. Army
p. 19 et 23

La mort subite
du nourrisson

p. 27, 29, 30, 32 Richard L. Naeye, Mil-
ton S. Hershey, Medi-
cal Center, Pennsylva-
nia State University
p. 28, 31 Ilil Arbel

Un campement
paléolithique
en Belgique

p. 43 Francis Van Noten,
Musée Royal d'Afri-
que Centrale, Tervuren,
Belgique
p. 35, 36, 41, 44 Andrew Tomko
p. 37, 42 Alan D. Iselin

L'écologie
sociale
des coyotes

p. 47 (haut) W. Perry Conway
p. 47 (bas), 48 Franz J. Camenzind
p. 49 à 53 Albert Miller

Les nouvelles
frontières
de la recherche
cancérologique

p. 56, 58, 59, Jean-Claude Venet
p. 60 (bas), 64
p. 57 Richard Véron
p. 60 (haut), 61, Institut de cancérologie
62, 63, 65, 66 et d'immunogénétique
(ICIG)

Les verres
métalliques

p. 81 Fritz Goro
p. 69 à 77 Allen Beechel
p. 78 Sigrid R. Herd

Des bactéries
recombinantes
pour fabriquer
des protéines
utiles

p. 83 Fritz Goro
p. 84 à 94 Bunji Tagawa

La structure
primitive
de l'Univers

p. 97 à 106 Jerome Kuhl

Jeux
mathématiques

p. 108 à 112 Ilil Arbel

Expériences
d'amateur

p. 115, 116, Jearl Walker
p. 117 (bas)
p. 114, 117 Michael Goodman
(haut), 118

POUR LA

SCIENCE

édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

Revue scientifique mensuelle éditée par la
Société Pour la Science S.A.R.L.

Rédaction
Administration

8, rue Férou, Paris 6*
Tél. 329.92.08
Télex : Libelin 202978 F

Services
des Abonnements

31, cours des Juilliottes
94704 Maisons-Alfort Cedex.
Tél. 375.66.78

SCIENTIFIC AMERICAN

Comité de Rédaction : Gerard Piel (Publisher); Dennis Flanagan (Editor); Francis Bello (Associate Editor); Philip Morrison (Book Editor); Samuel L. Howard (Art Director); Judith Friedman; Brian P. Hayes; Paul W. Hoffman; Jonathan B. Piel; John Purcell; James T. Rogers; Armand Schwab, Jr; Jonathan B. Tucker; Joseph Wisnovsky.

POUR LA SCIENCE

Directeur : Max Brossollet.

Rédacteur en chef : Philippe Boulanger, assisté de
Nicole Jetel, Christian Chaumereuil et Daniel Tacquenot.

Secrétariat : Annie Rouillard, Pascale Thiollier.

Direction commerciale et administrative : Claude Dorsemaine;

Josiane Dubreu; Dominique Weil; Jean-Philippe Ray.

Fabrication : Henri Rolais; Denis Lanson; J.-C. Venet.

Ont également collaboré à ce numéro :

M. Bernardi, F. Brégegère, M. Chêne, P. Dejours, S. Devers, M. Elissalt, C. Guthmann, J.F. Minster, F. van Noten, P. Pfeffer, B. Pire, J. Terrien, P. Tougne, M. Tournyol du Clos, Direction Recherche Étude et Technique de la Délégation Générale pour l'Armement.

Publicité

France : Françoise Teisseyre

59, avenue Marceau 75016 Paris — Tél. 720.72.51

Bernard Pingree

59, avenue Marceau 75016 Paris — Tél. 720.06.66

Étranger : C. John Kirby

415 Madison Avenue, New York, N. Y. 10017 — Tél. (212) 754.02.62.

Londres : Wallace S. Burgis

54, Pall Mall, London SW1Y 5 JH — Tél. (01) 839.15.95 — Télex : 915076

Services des abonnements

31, cours des Juilliottes, 94704 Maisons-Alfort — Tél. 375.66.78

ABONNEMENT

1 an, 12 numéros dont un numéro spécial.

France : 180 FF ttc — Autres pays : 220 FF — Tarif avion sur demande

Les numéros et les ouvrages de Pour la Science sont également en vente à la librairie E. Belin : 8, rue Férou 75006 Paris.

A NOS ABONNÉS :

La date d'expiration de votre abonnement est mentionnée en clair dans la première ligne de l'étiquette d'expédition. Nous vous prions de joindre cette étiquette à toute correspondance ou changement d'adresse. Pour tout renseignement concernant votre abonnement, nous vous conseillons de téléphoner aux Services Abonnements : 16 (1) 375 66 78. Merci.

Service de vente réseau NMPP

SOC — Michel Iatca, 24, boulevard Poissonnière, 75009 Paris — Tél. 523.25.60

© Pour la Science S.A.R.L. 1980.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ». La loi du 11 mars 1957 n'autorisant que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », toute représentation ou reproduction faite sans le consentement de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code Pénal.

Energie: plus on est informé, plus on a d'espoir.

Cet Index répertorie les brochures, les ouvrages, les articles qui apportent des informations sur l'énergie.

Besoins, ressources, coût et possibilités des différentes énergies: le solaire, le nucléaire, les éoliennes, les centrales marémotrices, etc. Plus de trois cents questions importantes sont traitées.



Cet Index permettra à tous les chercheurs, enseignants, journalistes, responsables, ingénieurs et à tous ceux qui veulent mieux comprendre les problèmes de l'énergie, de recevoir vite et facilement tous les éléments permettant d'avoir une information complète et détaillée, venant de tous les horizons.

ÉLECTRICITÉ DE FRANCE
Division Information sur l'Énergie.

Bon gratuit pour l'Index de Documentation sur l'Énergie.

Veuillez me faire parvenir, sans engagement de ma part, l'Index de Documentation sur l'Énergie.

Nom _____ Prénom _____

Adresse _____

Bon à retourner à AFID, BP 8209, 75421 Paris Cedex 09

IL Y A 50 ET 100 ANS



Les satellites de Mars

« On doit à M. Asaph Hall, directeur de l'observatoire naval de Washington, la découverte des satellites de la planète Mars. Cet éminent astronome a réussi à obtenir pendant l'hiver de 1880, une excellente série d'observations de ces satellites. A partir du 18 avril, le satellite extérieur, Deimos, était trop faible pour que l'on pût bien déterminer sa position. En revanche Phobos, le satellite intérieur, se montra plus brillant qu'on ne s'y attendait.

M. Hall a pu déterminer les temps des révolutions périodiques de ces satellites autour de Mars. Ces résultats sont 7 h 39 mn 13 s pour Phobos et 30 h 17 mn 54 s pour Deimos. Le calcul de l'état comparatif de ces astres, à la première et à la dernière opposition, lui fait espérer qu'il pourra les observer de nouveau avec la lunette de 26 pouces de Washington. »

L'Année Scientifique, par L. Figuier.

La grotte du Lazaret

A 100 mètres de la Méditerranée, en plein centre de la ville de Nice, la grotte du Lazaret est l'un des sites acheuléens les mieux connus. Cette grotte a été aménagée par des chasseurs du paléolithique, il y a près de 130 000 ans.

Découverte en 1879, cette caverne fut explorée pour la première fois en 1880 par un dénommé E. Rivière. Malgré l'intérêt des trouvailles faites dès cette époque, le site du Lazaret ne fut fouillé méthodiquement qu'à partir de 1955 sous la direction du grand préhistorien Henri de Lumley. Grâce aux données recueillies par les nombreux spécialistes qui travaillèrent pendant plus de 20 ans sur ce site, nous disposons aujourd'hui d'une interprétation paléo-ethnologique détaillée des traces trouvées dans cette caverne.

La grotte du Lazaret fut occupée au cours du Riss (avant-dernière période glaciaire) par des chasseurs de marmottes et de cervidés. Ils y édifièrent une vaste cabane de dix mètres sur trois qui témoigne d'une certaine sédentarisation de ces nomades.

La bataille du tout à l'égout

Pendant plus de trente ans, la question du tout à l'égout a provoqué des discussions et soulevé des passions. Comment évacuer de façon simple et propre les 900 000 mètres cubes d'immondices recueillis chaque année par les vidangeurs parisiens? La construction d'un réseau d'égouts sous les rues de la capitale fut envisagée, mais de nombreuses voix s'élevèrent pour critiquer ce projet. Plusieurs scientifiques, dont Pasteur, s'inquiétèrent des risques de propagations des maladies.

Les épidémies de variole, de choléra et de typhoïde qui se déclarèrent au cours de l'été 1880 dans plusieurs quartiers de la capitale ranimèrent la polémique. Certains expliquèrent par les mauvaises conditions d'hygiène l'ampleur de la catastrophe, d'autres accusèrent les quelques égouts existants d'être à l'origine de cette recrudescence épidémiologique. Or, l'épidémie ne toucha pas Gennevilliers qui était le lieu de déversement dans la Seine de toutes les matières de vidange.

En octobre 1880, le Conseil municipal se déclara favorable à la construction d'un réseau d'égouts à Paris, « élément indispensable pour l'amélioration des conditions de salubrité publique ». Malgré cela, l'arrêté instituant le tout-à-l'égout ne fut signé que le 8 août 1894 par le préfet Poubelle. Les dernières oppositions à ce projet, notamment de la part des propriétaires refusant d'effectuer les travaux de raccordement dans leurs immeubles, n'ont cessé qu'en 1905.

La périodicité du diamètre des troncs d'arbres

« M. Kraus a démontré que la tension transversale de l'écorce des arbres dicotylédones est soumise à une périodicité diurne et il en a conclu que l'augmentation de la tension devait être liée à celle de l'épaisseur de l'écorce et par conséquent du tronc tout entier. M. Kaiser a étudié ces changements sur un certain nombre d'arbres dicotylédones; voici en quels termes il résume ses résultats, qui, en somme, confirment ceux de M. Kraus.

Les troncs de nos arbres sont sujets à des changements périodiques diurnes de leur diamètre. Des premières heures du matin jusqu'aux premières heures de l'après-midi, le diamètre diminue régulièrement, atteint

un minimum pour augmenter ensuite jusqu'à un maximum qui coïncide avec le crépuscule; on observe ensuite une diminution, suivie d'une augmentation qui conduit, vers l'aube, à un second maximum. Les variations de l'épaississement de l'écorce suivent donc la même marche que celles de la tension. Il faut dire que sur un tronc de 40 à 50 millimètres, ces variations sont en général inférieures à un demi-millimètre. »

Annales d'Agronomie, 1880.

La pile de Clamond

Dans un circuit composé de plusieurs métaux dont les divers contacts sont tous à la même température, la somme des forces électromotrices est nulle et il ne circule aucun courant. Mais une force électromotrice apparaît et un courant circule dès que l'on chauffe l'un des contacts que l'on nomme habituellement « couple ». Cet effet, découvert en 1821 par Seebeck, fut utilisé pour la première fois en 1880 dans la pile de Clamond.

Cette pile est formée de couples dont l'un des éléments est un alliage de zinc et d'antimoine et l'autre un alliage de nickel, de zinc et de cuivre. Ces éléments sont montés en série de manière à former une couronne. Tous les contacts pairs se situent à l'intérieur de la couronne et sont chauffés par une flamme de gaz. Les contacts impairs sont disposés à l'extérieur et présentent à l'air une grande surface de refroidissement.

La pile de Clamond a l'avantage d'avoir une résistance interne très faible. Malgré cela, elle n'eut guère de succès, du moins comme source d'énergie.

De nouveaux chiens

Si l'origine du chien domestique se perd dans la nuit de la Préhistoire, l'apparition de certaines races est en revanche bien datée. Ainsi, en 1880, on vit dans plusieurs expositions canines anglaises les premiers spécimens de Yorkshire-terrier. Issu du croisement entre le Skye-terrier et le Manchester-terrier, ce chien a conservé de ses ancêtres un incontestable talent de chasseur ratier. Malgré sa petite taille (19 à 22 centimètres et un poids de 1,2 à 3 kilogrammes) c'est un excellent gardien.

La même année arrivèrent en Europe les premiers Chow-Chow. Ce lointain descendant du Loup boréal était utilisé par les Chinois comme chien de garde, mais aussi comme aliment. L'élevage du Chow-Chow débuta en Grande-Bretagne en 1887, ce qui permit de fixer la race dans son état actuel.

Les transports d'aviation

On en vient actuellement à une autre conception du porte-avions : celle des transports d'aviation. Au point de vue du prix, comme de la souplesse d'emploi, c'est un compromis entre l'emploi des bases terrestres fixes et celui des porte-avions à pont d'envol, qui sont de véritables bases flottantes, aussi mobiles que tout autre élément de la flotte. L'Empire britannique possède ainsi l'*Albatros* en Australie (6500 tonnes en achèvement). Les Etats-Unis ont transformé dans ce but un ancien cargo de 10 000 tonnes. Le Japon a également aménagé un très vieux bâtiment datant de 1900, pour en faire un transport d'aviation. L'Italie a, au contraire, adapté un bâtiment de commerce moderne, la *Citta-di-Messina*, devenue le *Giuseppe-Miraglia*, pouvant porter vingt appareils.

Cette catégorie de bâtiments, comme son nom l'indique, permet le transport d'appareils aériens; quelques-uns sont munis de catapultes. Dans tous les cas, l'appareil aérien, généralement un hydravion, ne peut revenir directement à bord du bâtiment. Il doit se poser dans le voisinage où il est repêcher.

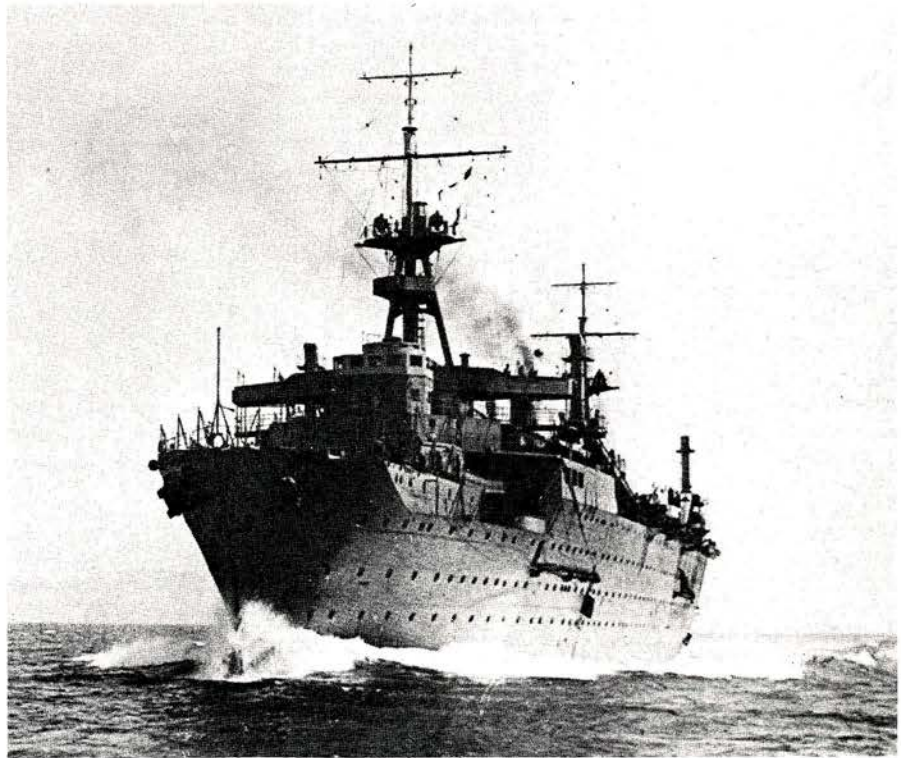
La marine française s'est orientée dans cette voie après avoir mis au point le *Béarn*, et elle a actuellement en achèvement à flot le *Commandant Teste*, qui s'annonce comme devant être un transporteur particulièrement réussi.

Ce bâtiment transporte des hydravions qu'il peut, soit lancer par catapulte, soit mettre à l'eau à l'aide de grues. Il est également aménagé pour transporter des appareils terrestres, montés ou non. Enfin, il est muni de toutes les installations permettant le ravitaillement, l'entretien et les réparations des appareils aériens. Ainsi, parmi les nations méditerranéennes, la marine française est la seule à posséder un porte-avion et un transport d'aviation moderne!

La Science et la Vie, 1930.

Les débuts du cyclotron

Les premières études sur les accélérateurs de particules datent de la fin des années 1920. Le nom d'Ernest Orlando Lawrence est indissociable de ces recherches. Au début de 1930, ce jeune et brillant physicien américain fut nommé professeur à l'Université de Californie. Profitant des facilités de recherche qui lui étaient alors offertes, E.O. Lawrence réalisa, avec l'un de ses élèves, le premier cyclotron.



Le commandant Teste

L'idée de confiner des particules dans une enceinte circulaire, au moyen de puissants champs magnétiques, lui était venue une année auparavant.

Construit en quelques mois, ce prototype fut un échec. Nullement découragé, Lawrence entreprit immédiatement la construction d'un deuxième modèle. Le succès récompensa son obstination puisqu'en 1932 ce cyclotron fournit des protons de 13 keV.

Fondateur du *Radiation Laboratory* de Berkeley, E.O. Lawrence reçut en 1939 le Prix Nobel de physique pour l'ensemble de ses travaux sur les accélérateurs de particules.

Les ultrafiltres

« L'emploi des ultrafiltres dans la recherche bactériologique est de plus en plus répandu, mais on rencontre encore des difficultés dans la mesure des pores de ces ultrafiltres. La méthode la plus courante consiste à filtrer une préparation contenant des bactéries d'une grandeur connue. Si ces bactéries traversent ou ne traversent pas la membrane, on en déduit le diamètre de ces pores. Toutefois, cette méthode n'est pas parfaitement exacte car les bactéries peuvent être absorbées par la membrane, tout en étant plus petites que ses pores, les protéines qui existent dans le milieu de dispersion peuvent boucher les pores, les bactéries peuvent avoir des dimensions variables et enfin la tension superficielle, le pH et les conditions de filtration influent sur le passage de ces bactéries.

Des chercheurs proposent de mesurer le diamètre des pores de ces membranes en examinant le passage, à travers ces membranes, d'une série de colloïdes de dimensions connues et purifiés par centrifugation coagulation fractionnée, etc., afin d'avoir des diamètres de particules constants. Les colloïdes qu'ils conseillent d'utiliser sont l'hydroxyde ferrique colloïdal, l'iodure d'argent, le trisulfure d'arsenic, le mastic, les sols de soufre et d'or. »

Revue Générale des colloïdes, 1930.

Le serpent de mer

Depuis l'Antiquité, de très nombreux récits évoquent la fin tragique d'hardis navigateurs, happés avec leurs embarcations par d'effrayantes créatures sous-marines. Au XVIII^e et au XIX^e siècles, les découvertes des paléontologistes révélèrent l'existence, durant l'Ère Secondaire, d'animaux monstrueux, longs de plusieurs dizaines de mètres. Certaines de ces créatures auraient-elles survécu?

Si les descriptions sont fréquentes, les preuves tangibles sont en revanche très rares. En 1930 toutefois des pêcheurs capturèrent dans l'Atlantique Sud, au large des côtes africaines, une larve de congre de 1,84 mètre de long. Habituellement, de telles larves ne mesurent qu'une dizaine de centimètres et il est vraisemblable que l'animal adulte aurait atteint une douzaine de mètres, si ce n'est davantage. Malgré sa taille, ce congre ne serait jamais devenu un danger pour la navigation!

SCIENCE ET SOCIÉTÉ

Les jupes disparaissent

La Fédération internationale du sport automobile (FISA) a décidé d'interdire à partir de 1981 le port des jupes dans les grands prix. Oh rassurez-vous, cette mesure ne concerne pas les belles égéries qui rôdent autour des bolides mécaniques mais les voitures de formule 1! Cette décision, dictée avant tout par des considérations de sécurité, condamne semble-t-il les voitures à effet de sol. Reviendra-t-on pour autant à la situation du sport automobile au début des années 1970? Rien n'est moins sûr!

Tout au long de l'histoire automobile, l'importance accordée à l'aérodynamique n'a cessé de croître. Deux points de vue justifient cette évolution : d'une part, une aérodynamique soignée est un facteur d'économie et de sécurité pour la voiture de « Monsieur tout le monde », d'autre part, c'est un élément clé du succès en course des modèles de compétition. On sait aujourd'hui engendrer des efforts aérodynamiques qui sont de l'ordre de grandeur du poids des véhicules. Ces efforts augmentent artificiellement l'adhérence des pneus et permettent dans les virages des accélérations transversales de 3 g (trois fois l'accélération de la pesanteur) pour les voitures de formule 1.

Pendant plus de soixante ans, la plupart des grands constructeurs concentrèrent leurs efforts sur une augmentation régulière de la puissance des moteurs. Les prototypes *Ford* et *Porsche* de sept et cinq litres de cylindrée qui remportèrent les 24 heures du Mans à la fin des années 1960 représentèrent l'apogée de cette tendance. Afin d'accroître la sélectivité des épreuves et pour faire ressortir les capacités des pilotes, les responsables du sport automobile ajoutè-

rent alors des chicanes et des virages au tracé de nombreux circuits. La recherche d'une vitesse de pointe très élevée devenait ainsi beaucoup moins intéressante. Selon une étude de la Société Matra, réalisée sur le circuit du Mans, la vitesse maximale n'est atteinte que pendant un court moment qui ne dépasse pas sept pour cent du temps moyen au tour. En revanche, les freinages représentent 21 pour cent du temps au tour, les entrées et sorties de virage 26 pour cent, enfin les périodes passées en adhérence totale (passage dans les virages) se taillent la part du lion avec 46 pour cent du temps au tour.

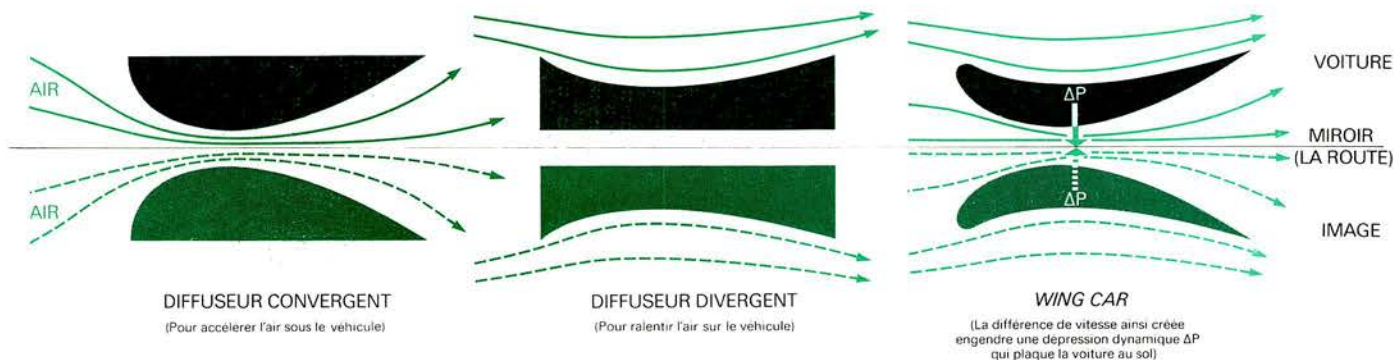
Comment augmenter l'adhérence sans nuire aux performances de la voiture? Reprenant les idées de Richie Ginther et de Jim Hall, plusieurs constructeurs installèrent des volets ou des ailerons à l'arrière des véhicules. La présence de ces surfaces augmentaient la résistance à l'avancement de la voiture; en revanche, elle apportait un surcroît d'adhérence fort appréciable pendant les périodes de freinage. Au début des années 1970, Jim Hall franchit un pas supplémentaire avec la *Chaparral* de *Can-am* qui fut la première voiture équipée d'un système d'aspiration. Un moteur auxiliaire aspirait l'air sous la voiture et le rejetait à l'arrière du véhicule. Telle une ventouse, le prototype était véritablement collé à la route. Seul inconvénient, les autres voitures étaient prises sous une averse de gravillons, recrachés avec violence par cette véritable « voiture aspirateur ». Quelque années plus tard Brabham réalisa une formule 1 à aspiration. Mais les responsables de la FISA ne tardèrent pas à interdire ces véhicules pour des questions de sécurité.

Poursuivant leurs recherches sur les moyens d'accroître l'adhérence des voitures de courses, les ingénieurs

s'intéressèrent de très près aux modalités de l'écoulement des fluides sous les véhicules. Il faut bien reconnaître que ce point avait été jusqu'alors très délaissé. Les raisonnements en matière d'aérodynamique automobile considéraient la route comme un miroir. La voiture et son image sont réunies par un appui, les pneus. Une telle liaison ne peut transmettre que des efforts de compression; or, tout gain en compression augmente l'adhérence du véhicule. Le comportement de la voiture ne dépend donc que des forces de liaison internes au système « voiture-image ».

Le système « voiture-image » dessine une sorte de conduit à l'intérieur duquel l'air circule. Qu'advient-il si la vitesse d'écoulement de l'air n'était pas la même de part et d'autre des parois de ce conduit fictif? Selon le théorème de Bernoulli, la pression d'un fluide diminue lorsque la vitesse d'écoulement augmente; par conséquent une différence de vitesse engendrerait une différence de pression entre le dessus et le dessous de la voiture. Pour profiter de cet effet de la mécanique des fluides, il faut ralentir l'air au-dessus du véhicule et l'accélérer au-dessous. La dépression dynamique créée à l'intérieur du conduit tend à plaquer la voiture et son image contre le miroir séparant les deux objets. La voiture bénéficie ainsi d'une beaucoup plus grande adhérence : c'est l'effet de sol.

Quelle forme donner au véhicule pour créer cette dépression dynamique? La réponse est venue du domaine aéronautique, en particulier des études réalisées sur les diffuseurs aérodynamiques comme les tuyères de réacteur. Ces dispositifs sont dérivés des classiques venturi. Si nous voulons avoir une différence de pression maximale entre les deux faces de la voiture, l'intérieur du conduit fictif voiture-image doit fonctionner comme un diffuseur convergent et l'extérieur comme un diffuseur divergent. En combinant les deux formes nous aboutissons à un profil qui ressemble à une aile d'avion inversée, d'où le nom de *wing car* donné à ces véhicules. Contrairement à un avion, une voiture est un objet qui a une largeur (une envergure) limitée. Pour



1. Le principe théorique des wing car.

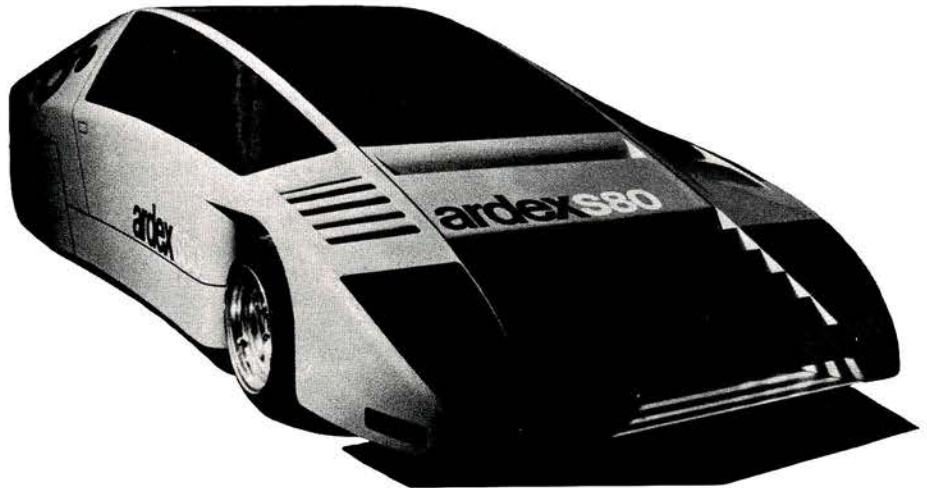
éviter que l'air pénétrant sous les côtés de la voiture ne vienne court-circuiter le fonctionnement du venturi, on boucle le système voiture-image avec des jupes coulissantes qui ferment latéralement l'espace compris entre la voiture et le sol.

Depuis longtemps, il existe des voitures ayant vaguement la forme d'une aile inversée. Toutefois, l'effet de sol n'a été réellement inventé que lorsqu'on a songé à placer des pertes de charges efficaces sur les bords des voitures. La Lotus 78 fut la première *wing car* construite. Conçue par Carl Chapman en août 1975, elle remporta ses premiers succès en compétition en 1977. Toutes les formules 1 se sont progressivement mises à la mode *wing car*. Au début, les voitures furent des copies pures et simples de la Lotus, ce qui permit à Chapman de maintenir sa supériorité. Toutefois l'arrivée de voitures originales (comme la Ligier S 11, la Ferrari T4 ou la Brabham-alpha), bénéficiant des derniers progrès de l'aérodynamique, bouleversa cet état de fait.

Les *wing car* n'ont pas que des avantages. Ce sont des voitures très difficiles à mettre au point et à régler. Le surcroît d'adhérence gagné grâce à l'effet de sol sollicite beaucoup plus le châssis et les suspensions. En outre, se sont des voitures qui peuvent se révéler dangereuses. Si l'une des jupes reste bloquée en position haute, la voiture devient vite incontrôlable et le pilote risque à tout moment la sortie de piste en raison de la perte d'adhérence. Plusieurs accidents graves survenus lors de grands prix de formules 1 sont imputables à un mauvais fonctionnement des jupes latérales, d'où la décision de la FISA.

Les voitures à effet de sol disparaîtront-elles pour autant? Les visiteurs du dernier salon de la voiture de course disposent d'un élément de réponse. Assez curieusement, la seconde génération des voitures à effet de sol était présente sous la forme d'un prototype, l'ARDEX S 80, destiné aux 24 heures du Mans 1981. Les voitures engagées dans cette épreuve, comme les véhicules de grand tourisme, n'ont jamais bénéficié de l'effet de sol car les règlements imposent une garde au sol de 10 centimètres. En outre, il semblait inconcevable de réaliser une voiture de grand tourisme avec des jupes frottant sur la route.

L'auteur de ce prototype, Max Sardou, est l'un des spécialistes français des voitures à effet de sol. Au cours de son passage à la Société Européenne de Propulsion, il participa à plusieurs études sur des *wing car*. L'ARDEX S 80 est la première voiture, autre qu'une formule, à bénéficier de l'effet de sol. Le bouclage du venturi situé sous la voiture n'est plus réalisé avec des jupes mais grâce à l'écoulement de l'air autour de



2. Le prototype ARDEX S 80.

la voiture. L'ARDEX S 80, se comporte un peu comme un chasse-neige. Grâce à la forme de sa carrosserie (en particulier le creusement des flancs du véhicule), la voiture engendre deux lames d'air qui s'échappent sur les côtés, empêchant ainsi l'air environnant de pénétrer sous la voiture. Ces lames d'air remplacent les jupes des *wing car*. L'intérêt de cette formule est double: d'une part, toutes les voitures peuvent bénéficier de l'effet de sol, d'autre part, plus aucune pièce ne frotte sur la route et il n'y a plus à craindre d'éventuels bloquages des jupes en position haute.

Selon son constructeur, l'ARDEX S 80, préfigure la berline des années 1980. En raison de leur profil, ces voitures n'auraient plus de portance et elles ne tendraient plus à décoller au-delà d'une certaine vitesse. En outre, le surcroît d'adhérence dû à l'effet de sol améliorerait l'efficacité du freinage et réduirait les risques d'aquaplaning. Enfin, dernier point important, le tracé de la carrosserie permet de réduire la traînée des véhicules et par conséquent de diminuer la consommation d'énergie.

L'ARDEX S 80 devrait participer aux 24 heures du Mans 1981 à condition de trouver d'ici là les appuis financiers nécessaires. Si les performances du véhicule confirment les espoirs de son constructeur, cette voiture aura une nombreuse descendance, tant en grand tourisme qu'en prototype... voire en formule 1. Les *wing car* actuelles apparaîtront alors comme des objets archaïques, dignes du Musée de l'automobile. L'effet de sol sans jupes n'est plus une utopie!

Mesure du biomagnétisme

Tous les êtres vivants, ou peu s'en faut, émettent un champ magnétique. Cette assertion n'a maintenant plus rien d'esotérique ou de

mystificateur, comme c'était le cas au XVIII^e siècle, quand Mesmer et son « fluide magnétique » fascinaient les publics de salon. Certains « mages » astucieux, voyants extra-lucides et autres illusionnistes font encore usage du terme à des fins peu avouables, mais pour les scientifiques il s'agit de tout autre chose. Depuis plus d'un siècle, en application des lois générales de l'électromagnétisme, les découvertes concernant l'activité électrique propre aux tissus vivants ont apporté la preuve de l'existence d'un champ magnétique associé.

Il a cependant fallu attendre le début des années soixante pour que des observations expérimentales viennent sur ce point confirmer la théorie. En effet, les systèmes de mesure magnétique dont on disposait jusque-là n'étaient pas suffisamment sensibles: on sait maintenant que l'ordre de grandeur des champs biomagnétiques ne dépasse pas 10^{-6} gauss (soit 10^{-10} Tesla) c'est-à-dire le millionième du champ terrestre moyen. Ce n'est qu'en 1962, avec un capteur inductif de grande dimension, que deux chercheurs américains, Baule et McFee, atteignirent une sensibilité de cet ordre, et purent mettre en évidence le champ cardio-magnétique chez l'homme. Deux couples de bobines portant chacune un million de spires sur noyau de ferrite permettaient d'éliminer la composante uniforme du champ magnétique terrestre. En raison du niveau élevé des parasites ambiants, Baule et McFee, qui travaillaient sans blindage, ne pouvaient pas recueillir directement le signal recherché; pour atténuer ce bruit de fond aléatoire et en extraire le signal cardiaque, il fallait passer par un artifice consistant à faire la moyenne d'une centaine d'enregistrements. La même technique fut reprise dans les années qui suivirent par des chercheurs soviétiques et français, mais l'exploration du biomagnétisme devait se développer tout autrement, grâce à l'apparition des magnéto-

tres à supraconducteurs. Le principe de ces appareils est fondé sur l'« effet Josephson », phénomène d'interférence quantique affectant deux supraconducteurs couplés par l'intermédiaire d'une faible surface de contact; sous l'effet d'un champ magnétique appliqué, cette jonction est le siège d'un courant haute fréquence, modulé en amplitude par le champ. Ces capteurs à effet Josephson sont connus sous l'appellation de « SQUIDS », abréviation de « Supraconducting Quantum Interference Device ». Leur mise en œuvre nécessite évidemment l'usage d'un cryostat (généralement un bain d'hélium liquide), la phase supraconductrice d'un conducteur n'apparaissant qu'àux environs de quelques degrés absolus. Il en résulte un certain encombrement, mais la haute sensibilité des SQUIDS est une contrepartie décisive à cet inconvénient: elle dépasse couramment 10^{-10} gauss, c'est-à-dire un dix milliardième du champ magnétique terrestre.

Il y a moins de dix ans, c'est à l'Institut de Technologie du Massachusetts qu'une équipe animée par D. Cohen fit les premières applications des nouveaux capteurs à la détection systématique des champs biomagnétiques chez l'homme. Grâce à la construction d'une chambre blindée très perfectionnée pour atténuer les parasites, cette équipe put mettre en évidence aussi bien le champ magnétique des poumons, du cœur et des muscles squelettiques que celui du cerveau (magnéto-encéphalogramme). Ces observations ont été reprises et complétées depuis par plusieurs équipes dans le monde et il est mainte-

nant possible de détecter les champs magnétiques associés à la plupart des principales activités physiologiques.

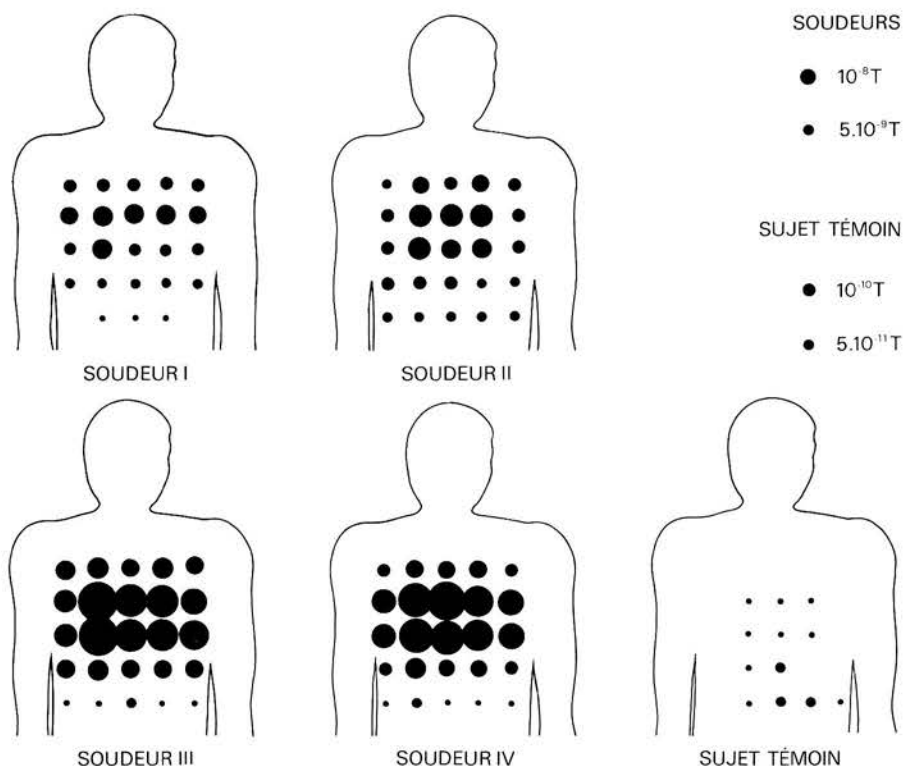
Par rapport aux techniques traditionnelles de l'électrophysiologie, les mesures biomagnétiques présentent plusieurs avantages. En effet, les tissus biologiques n'étant pas magnétiques eux-mêmes, en dehors de contaminations ferromagnétiques transitoires, l'origine des phénomènes biomagnétiques est exclusivement à rechercher dans l'existence de courants ioniques liés aux activités physiologiques. Dans le cas des mesures de différences de potentiel habituellement pratiquées en électrophysiologie, les sources électriques sont loin d'être aussi précisément déterminées. D'autres part, les capteurs magnétiques opèrent à distance; ils ne nécessitent aucun contact avec les tissus, ce qui élimine bien des difficultés techniques et des artefacts liés à l'usage d'électrodes superficielles (cutanées). Dans la pratique, ces avantages se traduisent par une meilleure connaissance du comportement électrophysiologique des divers organes, ainsi que par l'émergence de nouvelles méthodes de diagnostic médical. C'est ainsi, par exemple, que le magnéto-cardiogramme a permis la mise en évidence d'un courant continu lié aux lésions cardiaques par occlusion de l'artère coronaire. De même l'observation du champ cardiomagnétique d'un fœtus *in utero* permet la détection précoce des malformations cardiaques, alors que l'électrocardiogramme fœtal n'est pas directement mesurable. En neurologie, la meilleure directivité du magnéto-encéphalogramme autorise,

pour certaines lésions cérébrales, une localisation plus fine que l'électro-encéphalogramme classique.

Dans un tout autre domaine, les mesures magnétiques sont d'une puissante efficacité pour le dépistage et la surveillance de certaines maladies pulmonaires dues à l'inhalation de poussières, par exemple chez les mineurs d'amiante ou les soudeurs à l'arc (voir figure ci-dessous); ces poussières contenant une proportion de particules ferromagnétiques peuvent être aimantées *in situ* (dans les alvéoles pulmonaires) par une exposition inoffensive du sujet à un champ magnétique d'environ 500 gauss; la mesure des champs rémanents autour du thorax permet de dresser la « carte » de la contamination pulmonaire, même si celle-ci n'est pas décelable radiologiquement; la courbe de diminution de ce magnétisme rémanent au cours des semaines ou des mois qui suivent permet de contrôler le processus d'élimination des poussières contaminantes.

Un tel système d'exploration pneumo-magnétique, mis au point par une équipe dirigée par T. Katila à Helsinki, a été développé industriellement par une firme finlandaise et fonctionne d'ores et déjà en Suède, pour un contrôle médical de routine. Bien d'autres applications seraient à citer dans des domaines aussi divers que la recherche biologique fondamentale, la médecine clinique, la psychologie, l'épidémiologie, etc. Ainsi, les nouvelles connaissances et les progrès divers que le biomagnétisme apporte, ou apportera dans l'avenir, apparaissent déjà d'une grande importance dans plusieurs secteurs essentiels de la médecine ou plus généralement de la santé publique.

Au début de 1980, les capteurs magnétiques à supraconducteurs sont couramment utilisés dans au moins une douzaine de laboratoires aux États-Unis et en Europe, pour la détection des champs associés à diverses activités physiologiques chez l'homme. Aux États-Unis, il faut citer d'abord le MIT, puis les universités de New York, de Stanford, du New Jersey, du Colorado, etc. En Europe, plusieurs équipes finlandaises sont très actives dans ce domaine depuis des années, en particulier à l'université d'Helsinki. Dans d'autres pays, notamment en France, en Italie et en Tchécoslovaquie, les activités dans ce domaine restent sporadiques; elles concernent essentiellement la recherche du magnéto-cardiogramme, à titre d'essai magnétométrique. Toutefois, le développement du biomagnétisme en Europe semble assuré, malgré les problèmes de financement qu'il pose dans la conjoncture actuelle. De nombreux projets sont annoncés ici et là, en particulier en France où l'on envisage l'implantation d'un système de mesures magnéto-encéphalographiques en milieu hospitalier. Une



Carte de contamination pulmonaire chez des soudeurs à l'arc. Mesure du champ rémanent.

telle réalisation, qui mettrait en collaboration des médecins hospitalo-universitaires, des ingénieurs et des chercheurs appartenant à plusieurs organismes publics (Université Paris V, CEA-LETI, CNRS, INSERM), serait la première du genre.

Patrice NICOLAS
et Danielle TESZNER

Acoustique anti-bruit et métro

Réaliser un système acoustique actif antibruit est un vieux rêve des acousticiens et des électroniciens. Au lieu d'amortir simplement le bruit gênant par une accumulation d'absorbants plus ou moins coûteux et en tout cas encombrants, on engendre un son d'amplitude et de composition spectrale égales à celles du bruit, mais en opposition de phase avec celui-ci, ce qui l'annule. Le problème semble facile à première vue; il est en réalité fort complexe. Il faut réémettre des ondes sonores de même forme et même amplitude que les ondes primaires à détruire mais avec un signe opposé. Dans le cas le plus général, le bruit est un son complexe, composé d'harmoniques ayant éventuellement, outre des amplitudes, des déphasages différents: le problème s'en trouve donc compliqué.

Des chercheurs français du Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique de Marseille (C.N.R.S.) se sont attaqués au problème un peu plus spécifique du bruit basse fréquence dans une gaine de section rectangulaire. En effet, on peut montrer que des ondes sonores de relativement basses fréquences se propageant dans un tel guide rectangulaire peuvent être assimilées à des ondes planes. Une telle configuration simplifie notablement le problème de la reproduction exacte en opposition de phase de l'onde à détruire.

En revanche, quand on songe aux nombreuses gaines de ventilation utilisées dans l'industrie et ailleurs, la simplification en question débouche sur un grand intérêt pratique.

Dans le cas des ondes basses fréquences dans un guide, ces chercheurs ont su utiliser le fait qu'en principe une source tripolaire suffit à l'absorption dans le cas d'une source de bruit directionnelle. Un haut-parleur électrodynamique logé dans une enceinte fermée constitue un monopôle acoustique: seule sa face avant rayonne. Deux haut-parleurs montés dos à dos dans une enceinte constituent un dipôle. Une association de ces deux types de sources constituera un tripôle acoustique. Le Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique de Marseille a réalisé trois sources de ce type dont notamment une source

tripolaire intégrée. On a montré au laboratoire, en vraie grandeur, une installation expérimentale de climatisation avec gaine. Les chercheurs pouvaient à volonté faire varier les sections de la gaine, choisir la température de l'air et jouer sur la vitesse d'écoulement. C'est d'ailleurs à un système d'absorbeur acoustique actif en présence d'écoulement qu'ils ont abouti. Le capteur du son à éliminer est un microphone très haute fidélité. Le signal sonore à éliminer doit être traité et judicieusement déphasé avant d'être envoyé aux sources antibruit placées en aval du capteur.

Trois conditions assez strictes doivent être remplies afin qu'un système antibruit actif agisse efficacement dans un conduit où il y a écoulement: (1) le système antibruit ne doit rayonner aucune énergie dans la direction contraire à l'écoulement; (2) dans la direction de l'écoulement, le système doit au contraire rayonner un champ acoustique d'amplitude égale et de phase opposée au signal à éliminer; (3) enfin, le système ne doit pas perturber l'écoulement dans le conduit. La source tripolaire intégrée, réalisée à Marseille, est placée sur une paroi latérale de la gaine et remplit donc parfaitement cette dernière condition. Elle est en outre parfaitement directive et n'émet que dans le sens de l'écoulement, remplissant ainsi les deux premières conditions. Un microphone placé en amont du système ne peut pas être perturbé par celui-ci et ne capte donc que le bruit à éliminer.

Il est bien évident qu'il est plus facile de réaliser un traitement du signal en bande étroite de fréquences qu'en large bande. Actuellement, ce traitement a été réalisé en électronique analogique, mais il ne fait aucun doute qu'un traitement digital avec usage de microprocesseurs améliorerait les résultats obtenus. Ceux-ci sont déjà fort éloquentes. Pour des bandes de basses fréquences relativement larges (100 hertz), on obtient une atténuation de 20 décibels avec un système réalisable industriellement. Rappelons que l'élimination du bruit dans les conduits, même à l'aide de dispositifs passifs, comme les chicanes, est extrêmement peu efficace. On est alors amené à entourer les gaines de matériaux absorbants, encombrants et coûteux pour obtenir une isolation phonique extérieure. Celle-ci est réalisée de facto par le système absorbeur actif acoustique agissant dans la gaine.

Il n'est donc pas étonnant que ce système ait intéressé la Régie des Transports Marseillais (R.T.M.) qui exploite le métro de Marseille. En effet les bouches d'aération du métro créaient des nuisances acoustiques dans leur voisinage urbain. Une première installation, en 1979, du procédé absorbeur acoustique actif dit A3 sur une canalisation de ventilation du

métro de Marseille a permis d'obtenir aux basses fréquences mises en jeu (63 hertz, 155 hertz typiquement) un affaiblissement de 50 décibels sur un conduit de section carrée de deux mètres de côté. Le système est peu encombrant, il suffit de placer le microphone à environ un mètre de la source tripolaire intégrée qui représente sur la paroi de la gaine une excroissance assez négligeable. On continue à perfectionner le système et la collaboration entre le C.N.R.S. et la R.T.M. s'annonce très fructueuse, ainsi que les perspectives de digitalisation et d'information sur microprocesseurs du système de traitement du signal.

Claude GUTHMANN

L'anatomie des groupes

Les groupes sont un des concepts les plus utiles en mathématiques. Un groupe est une collection d'objets ou d'opérations de caractère non spécifié qui peuvent être combinés selon un ensemble de règles définies. En fait, les groupes décrivent différentes sortes de symétries; l'étude de ces structures abstraites, c'est-à-dire la théorie des groupes, éclaire des domaines très divers tels que la théorie des nombres, la physique des particules élémentaires et la cristallographie. Les groupes sont si intéressants que les mathématiciens cherchent depuis longtemps à comprendre leur structure intime en identifiant leurs éléments fondamentaux.

Au début de 1980, il semble qu'on se soit rapproché de ce but ultime grâce à la découverte tant attendue de la méthode de construction de deux groupes spécifiques. Ces groupes, désignés par F_1 (appelé aussi le « monstre ») et J_4 sont peut-être les derniers éléments d'un puzzle dont l'assemblage a pris plus d'un siècle. Les éléments de construction, les groupes simples, jouent le même rôle en théorie des groupes que les particules élémentaires en physique nucléaire et les facteurs premiers des nombres naturels en arithmétique. Tout comme un nombre naturel quelconque est égal au produit de nombres premiers, un groupe peut être représenté de façon unique par une « composition » de groupes simples. Ainsi, pour analyser les groupes, les mathématiciens aimeraient faire une liste complète des groupes simples et, surtout, classer tous les groupes simples ayant un nombre fini d'éléments. Ces groupes seraient les éléments de construction des groupes finis.

La plupart des groupes finis simples appartiennent à un ensemble constitué de dix-huit familles infinies; il existe cependant un petit nombre de groupes qui n'appartiennent à

aucune de ces familles mais qui ne constituent pas pour autant des familles particulières : on les appelle les groupes finis sporadiques et, s'il en existait une infinité, tous les efforts pour classer les groupes finis seraient vains. Heureusement, les mathématiciens estiment qu'il n'existe que 26 groupes sporadiques; cependant, en mathématique comme en physique des particules élémentaires, on peut souvent prédire l'existence d'un élément avant de l'observer ou de le construire. Jusqu'à tout récemment, 24 groupes sporadiques seulement avaient été construits et il fallait encore calculer deux groupes finis, les groupes F_1 et J_4 .

Les mathématiciens construisent généralement un groupe en s'appuyant sur des représentations naturelles de ce groupe : les transformations d'un objet géométrique, par exemple les symétries d'un polygone dans l'espace. Quand un groupe n'a pas de représentation géométrique simple, il faut le calculer par des méthodes plus « bestiales » utilisant des heures de calcul sur ordinateur. Ce fut le cas de J_4 qui comprend $86\,775\,571\,046\,077\,562\,880$ (ou $2^{21} \times 3^3 \times 5 \times 7 \times 11^3 \times 23 \times 29 \times 31 \times 37 \times 43$) éléments; son existence avait été conjecturée en 1973 par Zvonimir Janko de l'Université de Heidelberg. Les mathématiciens de Cambridge qui construisirent ce groupe, David Benson, John Conway, Simon Norton, Richard Parker et Jonathan Thackray, utilisèrent de nouvelles techniques théoriques mises au point par Simon Norton pour montrer que si J_4 existait il devait être engendré par une paire de deux matrices d'éléments binaires (0 et 1) de 112 lignes et 112 colonnes. Il fallut ensuite des calculs matriciels élaborés pour montrer que le groupe ainsi formé était bien J_4 . Ces calculs réalisés sur ordinateur donnèrent le bon résultat le 20 février à 4 heures du matin.

Le groupe F_1 , dont l'existence a été indépendamment prédite en 1972 par Bernd Fischer de l'Université de Bielefeld et Robert Griess de l'Université du Michigan, devait être construit différemment. R. Griess construisit le groupe entièrement « à la main », sans ordinateur; il n'a pas divulgué comment il a construit ce groupe, mais on pense généralement qu'il s'est aidé d'une représentation particulière de F_1 , un groupe de rotations dans un espace à $196\,883$ dimensions. F_1 le plus grand des groupes sporadiques, est particulièrement intéressant. On l'appelle le monstre puisqu'il contient $808\,017\,424\,794\,512\,875\,886\,459\,904\,961\,210\,757\,005\,754\,368\,000\,000\,000$ (ou $2^{46} \times 3^{20} \times 5^9 \times 7^6 \times 11^2 \times 13^3 \times 17 \times 19 \times 23 \times 29 \times 31 \times 41 \times 47 \times 59 \times 71$) éléments; cela ne l'empêche pas d'avoir une structure assez naturelle et il contient la plupart des autres groupes sporadiques (mais il

ne contient pas J_4). De plus, alors que la plupart des autres groupes sporadiques plus petits ont été construits à l'aide de longs calculs sur ordinateur, R. Griess affirme que leur existence découle très simplement de sa démonstration d'existence du groupe F_1 .

Pour classer tous les groupes simples finis il faut non seulement établir la liste des différents types de groupes, mais aussi démontrer que cette liste est complète. Des centaines de mathématiciens ont, pendant les trente dernières années, tenté de prouver ce théorème. Cet effort sans précédent, l'équivalent mathématique du projet Manhattan de construction de la première bombe atomique, a été l'œuvre de théoriciens américains et européens. En 1972, Daniel Gorenstein de l'Université Rutgers, établit un programme de démonstration de 16 étapes pour prouver que tout groupe simple fini appartenait à une des dix-huit familles ou était un des 26 groupes sporadiques. Michael Aschbacher de l'Institut de Technologie de l'Université de Californie prouva un certain nombre de théorèmes importants qui permettent de simplifier le programme de démonstration. Aujourd'hui, seuls quelques problèmes bien définis restent à résoudre et l'on s'accorde à penser que le programme sera terminé dans deux ans : le triomphe est imminent.

Ce dernier fait d'arme ne résoudra pas nécessairement le problème de savoir si F_1 et J_4 sont les derniers groupes sporadiques. La preuve complète sera extrêmement longue (10 000 pages selon D. Gorenstein) et il y aura certainement de petites fautes. Néanmoins, la plupart des mathématiciens estiment que le programme de classification et les techniques utilisées pour le réaliser, seront pour l'essentiel, corrects et que les inexactitudes pourront être corrigées. Il n'empêche qu'il se pourrait qu'un ou deux groupes aient échappé au recensement : on verra bien. La construction de F_1 et J_4 n'en est pas moins un important progrès.

Holographie et architecture

En 1948, le physicien britannique Denis Gabor inventa et décrivit le principe d'une nouvelle méthode d'enregistrement et de restitution des images qu'il baptisa holographie. Mais il fallut attendre 1962, c'est-à-dire la mise au point des premiers lasers, pour que soient réalisées les premières expériences d'holographie. Depuis cette date les techniques de l'holographie ont bien évolué et ont déjà donné lieu à d'importantes applications; l'holographie ne se limite pas à la reconstitution d'une simple image : elle est devenue aujourd'hui

l'une des branches les plus importantes de l'optique moderne. L'holographie est une méthode photographique très différente de toutes les méthodes classiques! Dans la photographie, la lumière diffusée par un objet est focalisée sur une émulsion sensible; la pellicule n'enregistre que des différences de luminosité car elle n'est sensible qu'à l'intensité des ondes qu'elle reçoit. On obtient une image plane d'un objet réel qui, lui, est en relief. Il y a donc perte d'information. En revanche, la technique de l'holographie est fondée sur l'enregistrement d'un réseau d'interférences d'ondes lumineuses. L'hologramme convenablement éclairé permet la restitution tridimensionnelle de l'objet, avec toutes ses propriétés optiques et lumineuses.

Si l'expérimentation est parfois délicate, le principe de l'holographie est assez simple. Pour enregistrer un hologramme, on divise en deux le faisceau lumineux issu d'un laser, au moyen d'une lame semi-réfléchissante. L'un des faisceaux éclaire directement le film sensible (la « plaque holographique »), l'autre est envoyé sur l'objet à enregistrer. Cet objet réfléchit la lumière reçue vers la plaque. La plaque holographique enregistre les interférences entre la lumière réfléchie par l'objet et la lumière directe. La figure d'interférences « mémorise » ainsi le relief de l'objet. Après développement, lors de la restitution, on éclaire la plaque sous le même angle : on reconstitue alors grâce au réseau d'interférences, une image virtuelle, en trois dimensions, de l'objet holographié : le relief et la profondeur sont fidèlement restitués. Ainsi, l'observateur a vraiment l'impression que l'objet est réellement présent!

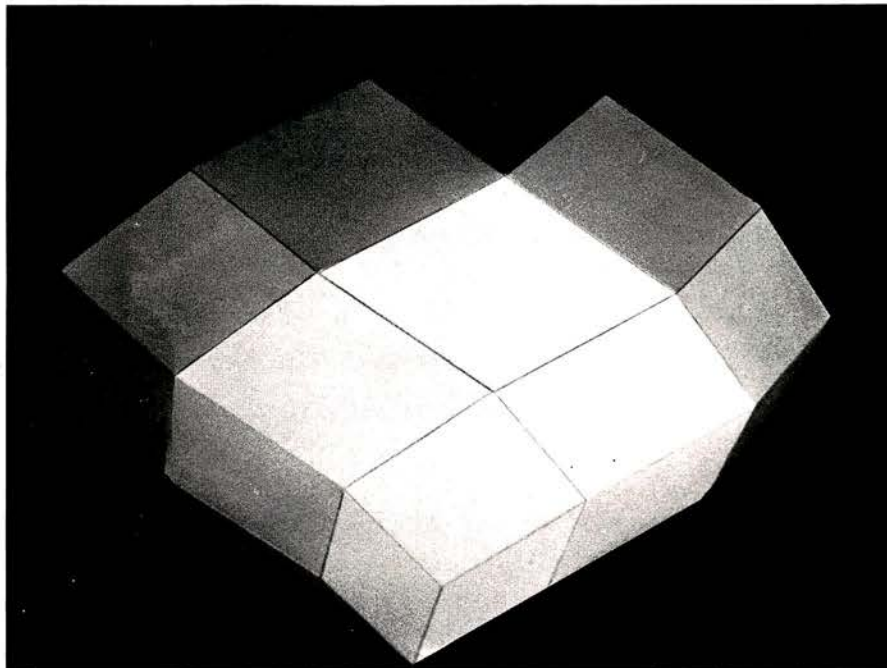
En outre, chaque point de l'objet a réfléchi de la lumière sur toute la surface de la plaque holographique : ainsi, un fragment d'hologramme cassé fournit, dans les mêmes conditions d'observation, la même image que l'hologramme entier. Pour que l'enregistrement d'un hologramme soit possible, il faut que l'onde lumineuse arrivant directement sur la plaque soit cohérente avec la lumière réfléchie par tous les points de l'objet. La source lumineuse doit donc être à la fois ponctuelle et parfaitement monochromatique. Grâce aux lasers, on a pu obtenir de telles sources. L'observation visuelle des images restituées, quant à elle, n'exige pas que la cohérence des ondes soit assurée sur l'ensemble de l'hologramme : aussi peut-on, quand l'objet n'est pas de trop grande dimension, utiliser pour la restitution une lumière pseudo-monochromatique (lampe à vapeur de mercure, par exemple). On réalise maintenant des hologrammes visibles simplement en lumière blanche : l'image aura la couleur correspon-

dant à la longueur d'onde du faisceau qui a servi à l'enregistrement. L'holographie est susceptible d'applications diverses, et ce dans bien des domaines. Outre la spectaculaire « photographie en relief », citons l'enregistrement de phénomènes « en volume » ou à évolution très rapide (les explosions par exemple), l'interférométrie, le traitement de l'information et la reconnaissance des caractères par filtrage optique.

Une expérience très originale vient d'être réalisée en France : elle exploite d'autres possibilités de l'holographie et met en lumière la puissance de cette technique dans le domaine de la génération et de la représentation des formes, pour l'architecture en particulier. Cette expérience a requis la collaboration d'informaticiens, de cinéastes, de physiciens opticiens et d'architectes; elle avait pour but de réaliser la projection dans le réel d'un « objet purement mathématique ». On conçoit que la difficulté principale à laquelle se trouve confronté l'architecte est de travailler sur un objet qui n'existe pas encore. De plus, il ne peut pas réaliser de prototype à l'échelle 1 ! Les systèmes de représentation jouent donc un rôle essentiel. En outre, il est apparu une complexification constante des formes architecturales (tant au niveau de la construction que des schémas fonctionnels). En effet, certaines fonctions qui doivent pourtant coexister dans le bâtiment, « s'excluent » mutuellement : d'où de nombreuses contraintes de construction. Les modes de représentation classiques — plan, coupes, axonométrie, perspective — sont liés au dessin, donc à une représentation bidimensionnelle. L'endoscopie et le maquetoscope ont permis d'avoir une notion de l'espace. Mais sur un film, la réalité n'est perçue que suivant la manière dont elle a été filmée (succession des plans, ordre des prises de vues, etc.). En revanche l'exploration visuelle de l'hologramme est strictement la même que celle de l'objet.

On peut évidemment photographier la maquette pour en faire l'hologramme, suivant la technique d'enregistrement habituelle. Le processus utilisé dans cette expérience, cependant, est fondamentalement différent : il s'agit ici de la création d'un hologramme synthétique.

La première étape de l'expérience a été réalisée par Jean Zeitoun, Directeur du Centre d'Informatique et de Méthodologie en Architecture (Direction de l'architecture du ministère de l'Environnement et du cadre de vie) et Jean-Louis Schulman, architecte ingénieur. Elle utilise la technique de la conception assistée par ordinateur. On imagine un solide géométrique, et l'on donne à la machine le programme de cette forme. Jean-Louis Schulman a choisi un rhomboèdre, figure suffisamment



Maquette du rhomboèdre holographié.

complexe (112 arêtes) et ne faisant référence à aucune forme architecturale connue (*voir figure*). Un dessin apparaît alors sur l'écran. L'ordinateur a engendré le volume à partir de la donnée de certains paramètres. Un programme de perspective permet de montrer le rhomboèdre sous tous ses angles. On avait, dans ce cas, une vue tous les tiers de degré, ce qui faisait 1080 vues pour un tour complet de l'image. Annie Forgja, architecte et cinéaste, de l'Association de recherche AAMUR, Unité pédagogique d'architecture N°6, prend alors 1 080 photos (en photographiant simplement l'écran).

La deuxième étape de cette expérience s'est déroulée à Strasbourg, au Groupe de Recherche et d'essais en photonique appliquée, sous la direction de Michel Grossman : elle consiste à réaliser ce qu'on appelle un hologramme *multiplex*, qui fera la synthèse des multiples informations. En fait, cela revient à réaliser une succession d'hologrammes. Un synthétiseur d'images à laser (mis au point à Strasbourg) transforme les 1 080 photographies en 1 080 hologrammes; ceux-ci sont rassemblés sur la même pellicule photographique et se présentent sous la forme d'étroites bandes verticales. Le film est alors appliqué sur un cylindre transparent en plexiglas; ce dernier est disposé verticalement et éclairé par en dessous. Le film restitue en relief intégral l'image du rhomboèdre qui apparaît « dans » le cylindre. De plus, le cylindre étant animé d'un mouvement de rotation, on voit « l'objet » tourner sur lui-même et présenter successivement toutes ses facettes. L'effet obtenu est très spectaculaire!

La réalisation de cette expérience peut sembler bien compliquée; elle

est pourtant très rapide. Il faut une heure pour prendre les 1 080 photos et environ une demi-heure pour faire l'hologramme. Au total, il faut trois heures et demie pour faire apparaître l'image virtuelle d'un objet qui, au départ, n'existe pas. A titre de comparaison on peut noter que la construction de la maquette de ce même rhomboèdre, si elle ne requiert que crayon, ciseaux, colle et carton, a nécessité deux journées de travail!

Cette expérience montre donc que l'holographie, associée à la conception assistée par ordinateur, permet de visualiser des formes architecturales complexes, difficiles à « lire » dans l'espace à partir d'une représentation bidimensionnelle.

En outre l'holographie permet de stocker des informations de natures très diverses. Ainsi, on peut enregistrer sur un même hologramme l'image d'un ouvrage (un pont par exemple) avant et après l'application de contraintes. Grâce à un modèle informatique, on obtiendra directement le champ des contraintes (donc leur forme et leur intensité) à partir de l'image des réseaux de franges d'interférences donnée par l'hologramme. De même, l'holographie permet de stocker des informations sur l'écoulement des fluides, les échanges thermiques, l'acoustique, l'aérodynamisme, etc.

Il est encore bien trop tôt pour dire si l'holographie va contribuer à une modification de notre environnement architectural car, en dehors des possibilités théoriques ouvertes, il reste à effectuer une recherche expérimentale et méthodologique importante avant que cette technique puisse faire l'objet d'applications pratiques dans ce domaine particulier.

La guerre chimique et le désarmement

Si les négociations en cours à Genève n'aboutissent pas à faire interdire le développement, la production et le stockage des armes chimiques, il faut craindre une phase nouvelle et particulièrement dangereuse de la course aux armements.

par Matthew Meselson et Julian Robinson

L'utilisation de gaz toxiques et d'autres armes chimiques en temps de guerre est interdit par le Protocole de Genève de 1925, aujourd'hui signé par toutes les grandes nations. Certaines nations considèrent que cet accord est une interdiction absolue; d'autres, en particulier les États-Unis, la Grande-Bretagne, la France, l'U.R.S.S. et la Chine, ne s'interdisent que d'employer ces armes les premières et ont formellement réservé leur droit de riposte si l'adversaire les utilisait en premier. De toutes les nations membres de l'Organisation du Traité de l'Atlantique Nord (OTAN), seuls les États-Unis et la France disposent de stocks importants d'armes chimiques; ces nations désirent conserver un tel armement pour pouvoir riposter à une éventuelle attaque chimique.

Depuis 1976, les États-Unis et l'U.R.S.S. ont entamé à Genève des négociations visant à un accord bilatéral de désarmement chimique qui interdirait recherches, perfectionnements, production et stockage de ces armes. (A noter que la Convention de 1972 sur les armes biologiques comporte une telle interdiction mais elle ne s'applique qu'aux agents biologiques et pas aux armes chimiques). Les réunions bilatérales ont abouti jusqu'à présent à des accords importants sur la nature de ce qui doit être interdit et sur le principe d'un contrôle à la fois national et international des dispositions prises. En revanche, les accords sur les moyens de contrôle à adopter posent des problèmes non résolus à ce jour.

Alors que les négociations se poursuivent entre les États-Unis et l'URSS au Comité international sur le désarmement, à Genève, les États-Unis et leurs alliés de l'OTAN ont mis en chantier un important programme de renforcement et de modernisation de leurs moyens de protection contre toute attaque chimique. Ces mesures, de caractère défen-

sif, ont été approuvées par les gouvernements des pays de l'OTAN qui les considèrent nécessaires dans la situation présente et pensent qu'elles devront être maintenues par prudence même si un accord interdisant les armes chimiques est signé.

Alors que la protection contre les effets d'une guerre chimique est constamment améliorée, les États-Unis n'ont pas pour autant augmenté leur stock de munitions chimiques depuis 1969. Le stock américain, très important, est presque entièrement situé sur le territoire des États-Unis; son efficacité en tant que « force de représailles » est toutefois limitée pour deux raisons : d'une part l'effort logistique qu'impliquerait son déploiement en Europe en temps de guerre et, d'autre part, une certaine résistance, au sein de l'OTAN, à intégrer les armes chimiques dans les structures militaires et dans les plans de défense de l'Alliance Atlantique. Les crédits demandés par l'armée américaine pour construire des usines de production d'une nouvelle génération de munitions chimiques dites « binaires » ont été rejetés par le Congrès des États-Unis; les diplomates pensent que de telles subventions gêneraient les négociations en cours sur la limitation des armes chimiques. De plus, les états-majors s'interrogent sur l'intérêt militaire des représailles chimiques et sur les interférences éventuelles avec la dissuasion nucléaire.

En définitive, la politique des États-Unis en ce qui concerne les armes chimiques se trouve à la croisée des chemins. Si un traité satisfaisant est signé, il y aura désarmement chimique. Dans le cas contraire, les États-Unis seront amenés à reprendre la fabrication d'armes nouvelles et ils devront persuader les nations de l'OTAN de les intégrer dans leurs plans de défense. Nous nous proposons de décrire dans cet article les aspects techniques, militaires et politi-

que qui conditionnent les choix à faire par les États-Unis et leurs alliés.

Les armes chimiques

Les constituants des armes chimiques modernes sont des composés organophosphorés neurotoxiques; ces composés appartiennent à la même famille que les pesticides mais sont beaucoup plus toxiques. Le premier de ces composés, le Tabun, a été découvert en Allemagne en 1936 au cours de recherches sur les insecticides. Le gouvernement allemand en vit tout de suite l'intérêt militaire et, dans le secret, en ordonna la fabrication; il fit aussi étudier les méthodes de production d'un composé aux caractéristiques voisines, découvert en 1938 et qui fut appelé Sarin. Cependant, alors que les armes



1. DANS L'ENTREPOT MILITAIRE de Tooele (Utah) les gaz neurotoxiques sont stockés sous forme liquide dans des conteneurs métalliques. La capacité de l'ensemble est estimée à quatre millions de litres

chimiques avaient été très utilisées au cours de la Première Guerre mondiale, les nations belligérantes se sont abstenues d'en faire usage pendant la dernière guerre; ainsi les gaz neurotoxiques n'ont jamais été utilisés.

Les gaz neurotoxiques sont habituellement stockés sous forme liquide. Selon le degré de volatilité de l'agent utilisé, ils peuvent être en temps de guerre diffusés sous forme d'un nuage de vapeur ou sous forme de gouttelettes dispersées par des moyens explosifs, mécaniques ou thermiques; ces gaz sont aspirés dans les poumons ou sont absorbés à travers la peau. Le gaz neurotoxique tue un individu en se fixant sur l'enzyme acétylcholinestérase et en le neutralisant. Le blocage de l'enzyme engendre une rapide accumulation de l'acétylcholine (substance de transmission synaptique) qui est normalement décomposée par l'acétylcholinestérase quelques millisecondes après avoir été libérée aux terminaisons nerveuses. L'accumulation d'acétylcholine dans les ganglions et les effecteurs autonomes, aux jonctions neuromusculaires du squelette et aux synapses du système nerveux central, provoque des symptômes caractéristiques: transpiration intense, engorgement des bronches par du mucus, contraction des bronches, affaiblissement de la vue, vomissements et défécation incontrôlés, convulsion et finalement paralysie et étouffement. Les gaz neurotoxiques provoquent en quelques minutes la mort par asphyxie. Si la dose reçue est légèrement inférieure à la dose provoquant une mort instantanée ou si l'empoisonnement est provoqué par contact avec la peau, la mort n'advient qu'au bout de plusieurs heures; des doses plus faibles n'entraînent que des troubles neurologiques et psychiatriques. La

désintoxication naturelle après un empoisonnement par gaz neurotoxiques est lente; c'est pourquoi la dose mortelle est sensiblement la même, qu'elle soit absorbée d'un seul coup ou en plusieurs heures. Il existe des antidotes d'une efficacité limitée mais la meilleure défense contre les gaz neurotoxiques (et contre tous les agents de guerre chimique) est le port d'un masque à gaz; pour se protéger des agents vésicants qui attaquent la peau, il faut porter des vêtements spéciaux.

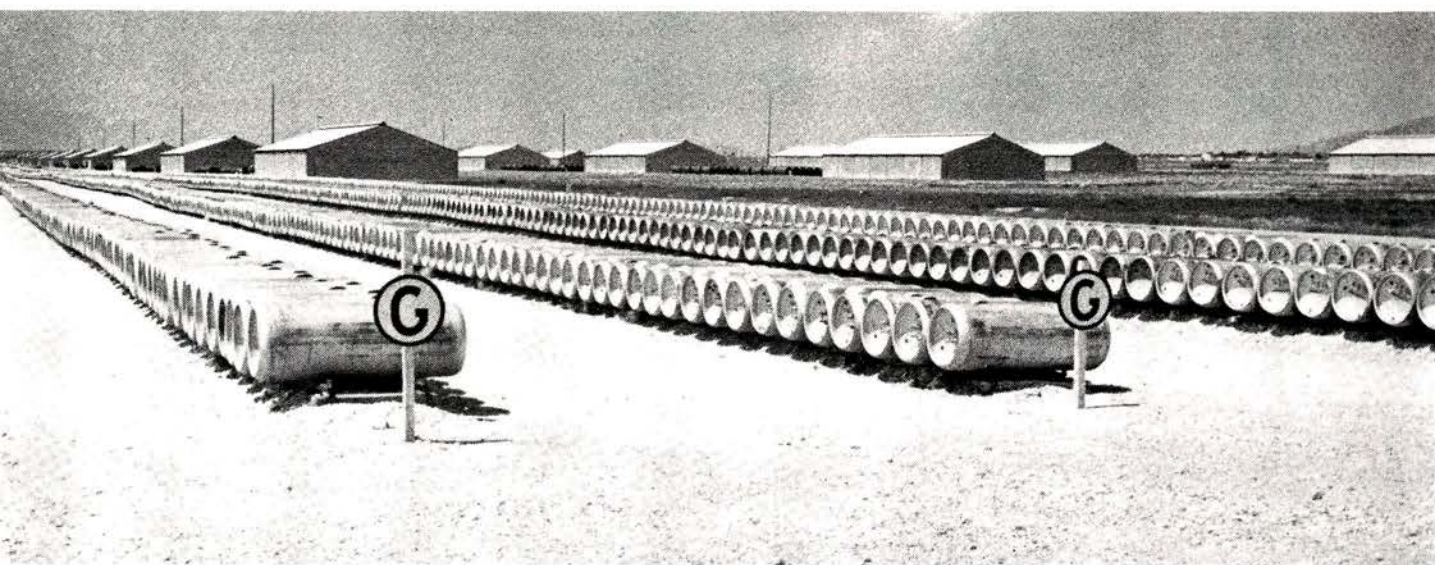
Parmi la centaine de composés organo-phosphorés pouvant être utilisés comme armes de guerre, trois retiennent plus particulièrement l'attention; leurs noms chimiques sont: le méthylfluorophosphonate d'isopropyle (aussi dénommé agent GB ou Sarin), le méthylfluorophosphonate de pinacolyle (agent GD ou Soman) et le méthylthiophosphonate d'O-éthyl-S-diisopropyl-aminoéthyle (agent VX). On estime qu'un milligramme de Sarin et 0,4 milligramme d'agent VX sont la dose mortelle moyenne pour un homme, la dose mortelle du Soman se situant entre ces deux limites. Le Sarin qui a une volatilité voisine de celle de l'eau, serait utilisé en priorité pour la contamination de l'air. L'agent VX dont la volatilité est celle d'une huile lourde serait utilisé sous forme de gouttelettes et répandu sur le sol et toute surface avec laquelle l'ennemi pourrait entrer en contact. Le VX, appliqué dans la proportion de 300 kilogrammes au kilomètre carré constitue un danger mortel (par seul contact avec la peau) qui subsiste pendant plusieurs jours ou plusieurs semaines, selon l'état de l'atmosphère. Le Sarin étant diffusé dans l'air, son effet (moins durable) dépend essentiellement des mouvements de l'atmo-

sphère et de la température ambiante; en général la quantité nécessaire pour produire un mélange respiratoire mortel est comprise entre 100 et 3 000 kilogrammes au kilomètre carré.

Le Sarin et le VX sont les deux gaz neurotoxiques stockés aux États-Unis. Le Soman, fabriqué pour la première fois en 1944 par les Allemands, semble être le gaz neurotoxique fabriqué en URSS. La volatilité du Soman est voisine de celle du Sarin mais on peut augmenter sa persistance en l'épaississant avec des polymères synthétiques. On pense que les réserves importantes du gaz connu en URSS sous l'appellation VR. 55, sont de ce type. Le tabun (O-éthyl N, N-diméthylphosphoromidocyanide, aussi connu sous le nom de GA) est un gaz neurotoxique qui a été longtemps considéré comme la base de l'arsenal chimique russe; ce gaz est maintenant dépassé mais il en reste probablement des stocks importants.

Aucun poison sur le champ de bataille n'est plus efficace qu'un gaz neurotoxique; un tel gaz qui associe forte toxicité et rapidité d'action, efficacité sur la peau et sur le système respiratoire, facilité de dissimulation, coût faible et stabilité, est supérieur à tout autre agent chimique. D'autres agents, plus anciens, sont considérés comme dépassés; on doit cependant les prendre en compte car il en existe encore des réserves très importantes. L'acide cyanhydrique et le sulfure d'éthyle dichloré, plus connu sous le nom de gaz moutarde (ou ypérite), sont des exemples de gaz périmés.

Les agents dits incapacitants ou paralysants sont moins nocifs: ils ont pour objectif de mettre temporairement l'ennemi hors de combat pendant plusieurs heures ou plusieurs



d'agent GB (ou Sarin) qui est un composé organophosphoré extrêmement toxique, de la famille des pesticides. Pour un homme adulte, la dose mortelle de Sarin est de un milligramme. Les hangars que l'on aperçoit dans le fond contiennent des munitions déjà chargées de Sarin. Les objets noirs qui sont entassés entre les bâtiments sont des réservoirs

d'épandage de 640 litres destinés à l'aviation et qui sont remplis d'un autre gaz neurotoxique, l'agent VX plus dangereux que le Sarin puisque la dose mortelle est 0,4 milligramme. Environ 40 pour cent du stock américain de gaz de combat (gaz neurotoxique et gaz moutarde) est stocké dans cet entrepôt.

jours, sans le tuer (en principe) et sans entraîner d'effets nocifs durables. Bien qu'on ait étudié beaucoup de gaz incapacitants, aucun ne s'est révélé satisfaisant. Un produit anticholinergique psychotrope connu sous l'appellation d'agent BZ (hydroxy-3-quinuclidine) a été un certain temps stocké aux États-Unis dans ce but, mais de nombreux inconvénients sur le plan militaire et notamment le fait qu'il induise quelquefois la folie, l'ont fait abandonner. Les seules armes antipersonnelles non mortelles qui font actuellement partie de l'arsenal chimique des États-Unis utilisent des agents CS dits « irritants » (malononitrile ortho-chlorobenzylidène) et CR (dibenz (bf) (1,4) oxazépine). Utilisés également par les forces de police, ces agents ont été classés dans la catégorie « anti-émeutes ». Pendant la guerre du Vietnam, les États-Unis ont fait un usage intensif des agents CS, considérant que le Protocole de Genève ne les interdisait pas. La brièveté de leur action et l'efficacité de la protection qu'assure le simple port du masque font que ces agents sont considérés comme absolument inadaptés au combat dans une guerre moderne.

L'importance du stock d'armes

L'importance du stock américain de munitions chimiques mortelles est

un secret militaire mais on peut l'évaluer à partir d'informations dans le domaine public. On a fabriqué environ 15 000 tonnes de Sarin entre 1953 et 1957 et quelque 5 000 tonnes de VX entre 1961 et 1967. On estime à 5 000 tonnes les quantités de gaz neurotoxiques (principalement du Sarin) qui ont été détruites parce que périmées ou excédentaires. Un quart des stocks qui restent sont conservés en conteneurs et trois quarts sont chargés dans des munitions. On estime que, depuis 1950, l'inventaire des forces armées américaines comprend une trentaine de types de munitions neurotoxiques; parmi celles-ci une moitié a été produite en quantités importantes. Certaines munitions sont à présent périmées : elles ont été, ou vont être, rayées des inventaires. Il reste actuellement dans les stocks environ trois millions de projectiles d'artillerie (obus GB de 105 mm, obus de 155 mm GB et VX et obus GB et VX de 8 pouces), plusieurs milliers de bombes aéroportées GB de 500 et 750 livres, des centaines de milliers de mines terrestres VX de deux gallons et environ 1 500 réservoirs d'épandage VX pour l'aviation dont la contenance est de 620 litres. De grandes quantités de gaz moutarde, datant de la Seconde Guerre mondiale, sont encore stockées, soit en conteneurs, soit dans des munitions et leur volume est sensiblement le même que celui des gaz neurotoxiques. Le total des stocks

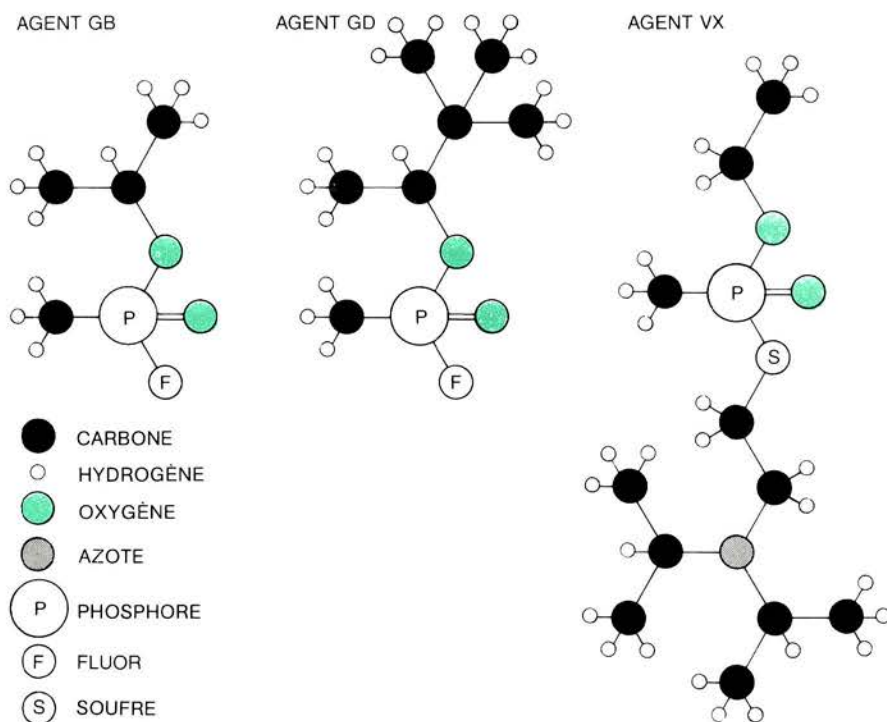
américains de munitions chimiques mortelles est estimé à environ 150 000 tonnes, ce chiffre étant le poids total des munitions et non celui des produits chimiques qui y sont contenus. Le poids des munitions chargées en neurotoxiques représente environ deux tiers du poids total.

Le poids total des munitions chimiques américaines mortelles est environ égal au quart du poids des munitions conventionnelles dont l'armée américaine dispose en Europe. Seule une faible fraction des armes chimiques américaines est déployée hors du territoire national : les rares lieux de stockage sont situés dans l'île Johnston dans le Pacifique et en Allemagne fédérale. Les armes entreposées en Allemagne sont placées sous le contrôle exclusif des États-Unis; ce sont des munitions terrestres qui correspondent à peu près à deux semaines d'opérations de guerre chimique.

Si le gouvernement et le Congrès des États-Unis acceptent le nouveau projet, les États-Unis posséderont une nouvelle munition de guerre chimique, le projectile d'artillerie GB de 155 mm. Au lieu de contenir du gaz déjà constitué, cet obus renfermera deux composants primaires, contenus dans des réservoirs séparés. Au départ du coup, les réservoirs éclatent et leurs contenus réagissent l'un sur l'autre pour former le gaz neurotoxique pendant le parcours aérien du projectile. L'un des deux réservoirs peut très bien être conservé et expédié indépendamment de l'autre pour n'être mis en place qu'à l'arrivée sur la position de tir. Cette caractéristique des munitions neurotoxiques dites « binaires » est un facteur de sûreté; elle a été conçue pour donner une plus grande souplesse aux opérations de stockage, de transport et de déploiement des armes chimiques et pour se prémunir contre des fuites accidentelles de gaz toxique.

On a peu de renseignements sur les armes chimiques de l'URSS, tant sur leur qualité que sur les quantités existantes. Les Soviétiques n'ont jamais rien laissé filtrer sur ce sujet et les estimations qui ont été données reposent davantage sur une évaluation de leurs besoins militaires que sur des indications concrètes. Des représentants du Secrétariat à la Défense aux États-Unis ont déclaré qu'on ne pouvait accorder qu'une confiance limitée aux estimations qui circulent sur l'importance des stocks de l'URSS; on sait toutefois que la plus grande partie de ces stocks est déployée près des pays européens et au voisinage de la frontière chinoise. On pense qu'une partie de cet armement est constituée de munitions neurotoxiques, le reste étant essentiellement composé de gaz moutarde et d'acide cyanhydrique.

Les Soviétiques considèrent-ils,



2. LA STRUCTURE CHIMIQUE des trois anticholinestérases organophosphorés (ou gaz neurotoxiques) les plus fabriqués aux États-Unis et en URSS est indiquée par ces formules développées. On y trouve de gauche à droite les composés suivants : méthylfluorophosphonate d'isopropyle (agent GB ou Sarin), méthylfluorophosphonate de pynacolyle (agent SD ou Soman) et méthylthiophosphonate d'0-éthyl-S-diisopropylaminoéthyle (agent VX). Les agents GB et VX sont les deux gaz neurotoxiques standards des États Unis. L'agent GD est considéré comme le gaz neurotoxique standard de l'URSS.

comme les Américains, que les armes chimiques ne peuvent être utilisées qu'en guise de riposte? Nul ne le sait. On croit seulement qu'ils auraient augmenté leurs stocks d'armes et leurs équipements de protection vers la fin des années 1960. Si ce renseignement est exact, il montre que leur décision a été prise au moment où les États-Unis décidaient de ne plus augmenter leur arsenal d'armes chimiques. Dans son rapport sur la situation des forces américaines en 1979, le président du Comité des chefs d'État-Major américain a fait savoir, qu'en URSS, l'autorité ayant pouvoir de décision pour l'emploi des armes chimiques est le Politburo, le conseil le plus élevé de l'État soviétique.

La protection passive

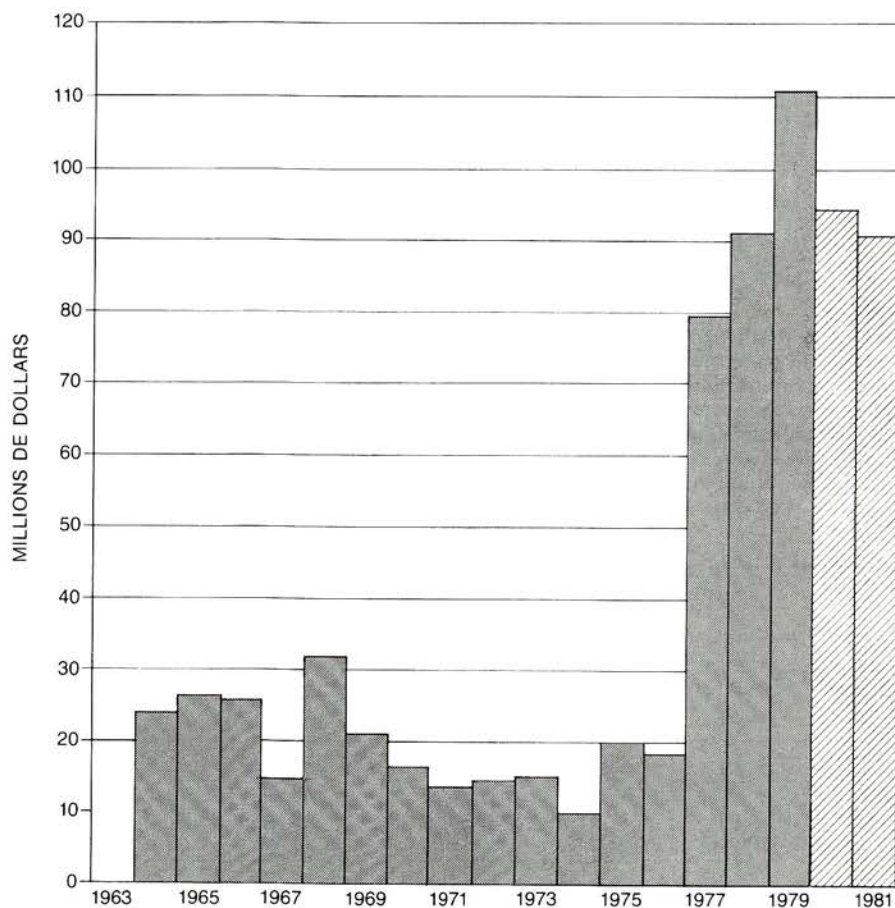
On peut protéger les combattants contre les effets des armes chimiques beaucoup plus facilement que contre les autres armes, sans pour autant empêcher les soldats de remplir la plupart de leurs missions normales. C'est là un aspect très particulier de la guerre chimique qui a des répercussions stratégique et tactique. Le premier moyen de défense contre la guerre chimique (valable également contre les retombées radioactives) est la protection physique procurée par les masques à gaz, les vêtements spéciaux et les appareils filtrants dans les abris collectifs. Des masques bien ajustés peuvent réduire la concentration d'un agent chimique dans l'air au cent millième de sa valeur initiale. Les filtres utilisés contiennent du charbon activé pour l'adsorption des gaz ainsi qu'un matériau (papier filtre) pour filtrer les particules. Afin d'accroître la protection contre les composés constitués de très petites molécules (tels que l'acide cyanhydrique), le charbon est imprégné de composés cuivreux ou d'autres réactifs chimiques. Les masques utilisés par l'OTAN sont mis en place en moins de dix secondes et peuvent être portés pendant de longues périodes, même durant le sommeil. La tension physiologique que provoque le port du masque est mineure et les effets psychologiques sont atténués par un entraînement convenable. Le masque américain actuellement mis au point comportera de nombreux perfectionnements en particulier pour ce qui concerne la vision et la transmission de la parole; il sera en outre plus léger que le modèle actuel. On sait par ailleurs que le masque russe est efficace mais il est plus difficile à mettre que le masque de l'OTAN; il est également plus lourd et moins confortable.

Les forces américaines stationnées en Europe sont équipées soit du vêtement de protection britannique MK3, soit d'un vêtement américain très semblable mais plus moderne. Il

s'agit en réalité d'un survêtement constitué de deux pièces. Pour une protection complète, il est nécessaire de le porter avec des bottes et des gants de caoutchouc. Le vêtement américain pèse deux kilogrammes; il est étanche à l'eau mais perméable à l'air. Il comporte deux couches de tissu; la couche extérieure, qui est particulièrement résistante, est traitée pour permettre aux gouttelettes de gaz neurotoxique qui s'y fixent de s'évaporer très rapidement. La vapeur qui pénètre est adsorbée par le charbon activé recouvrant la partie interne de la couche intérieure. Ce vêtement de protection qui « respire » (il laisse passer la transpiration et permet les échanges de chaleur) n'est guère plus gênant à porter qu'un vêtement ordinaire. Aux températures régnant en Europe centrale, la diminution de combativité liée à la chaleur est minime pour un soldat entièrement équipé. Mais si la température ambiante dépasse 25 °C, le soldat équipé ne pourra guère avoir d'activités soutenues que pendant une heure ou alors il devra accepter une diminution de la protection en retirant les gants ou en ouvrant le haut du vêtement. En URSS, les vêtements protecteurs sont constitués d'un tissu caoutchouté imperméable

à l'air. A 15 °C, ils peuvent être portés pendant quatre heures consécutives sans effet de chaleur appréciable; au-dessus de 20 °C ce délai est ramené à moins d'une demi-heure. Il semblerait que les Soviétiques étudient un nouveau vêtement de protection nettement amélioré.

Pour les occupants d'un véhicule de combat, la protection individuelle est généralement remplacée par un système de protection collectif. Les chars russes et les chars européens des nations membres de l'OTAN sont étanches et disposent d'un système d'approvisionnement en air filtré et pressurisé; les équipages sont ainsi protégés sans avoir à porter de masques. Les Soviétiques semblent vouloir généraliser cette méthode de protection; c'est ainsi qu'ils l'appliquent aux transports de personnel blindés ainsi qu'aux véhicules chargés du transport de certains éléments d'infanterie. Les Américains ont choisi d'équiper leurs véhicules blindés d'une centrale alimentant un circuit d'air pressurisé et filtré sur lequel on branche les masques individuels. Cette méthode permet aux chars de circuler panneaux ouverts et à l'équipage de monter ou descendre facilement du véhicule. Le système général de protection collective est réservé



3. LES DEPENSES BUDGETAIRES DES ETATS-UNIS pour les équipements de protection contre la guerre chimique ont augmenté considérablement au cours des dernières années. Ceci fait suite à la décision qui a été prise d'améliorer la capacité de défense contre la guerre chimique des nations de l'OTAN en Europe. Les dépenses sont renormalisées en dollars constants de 1973. Les barres avec hachures correspondent aux prévisions pour 1980 et 1981.

à certains véhicules spécialisés tels ceux affectés au commandement ou aux transmissions, ainsi qu'à certaines unités mobiles lance-missiles. Une protection collective est encore prévue (et cela dans les deux camps) pour les installations fixes : postes de commandement et abris destinés à recevoir par rotation les éléments de première ligne qui ont besoin de soins médicaux ou de repos.

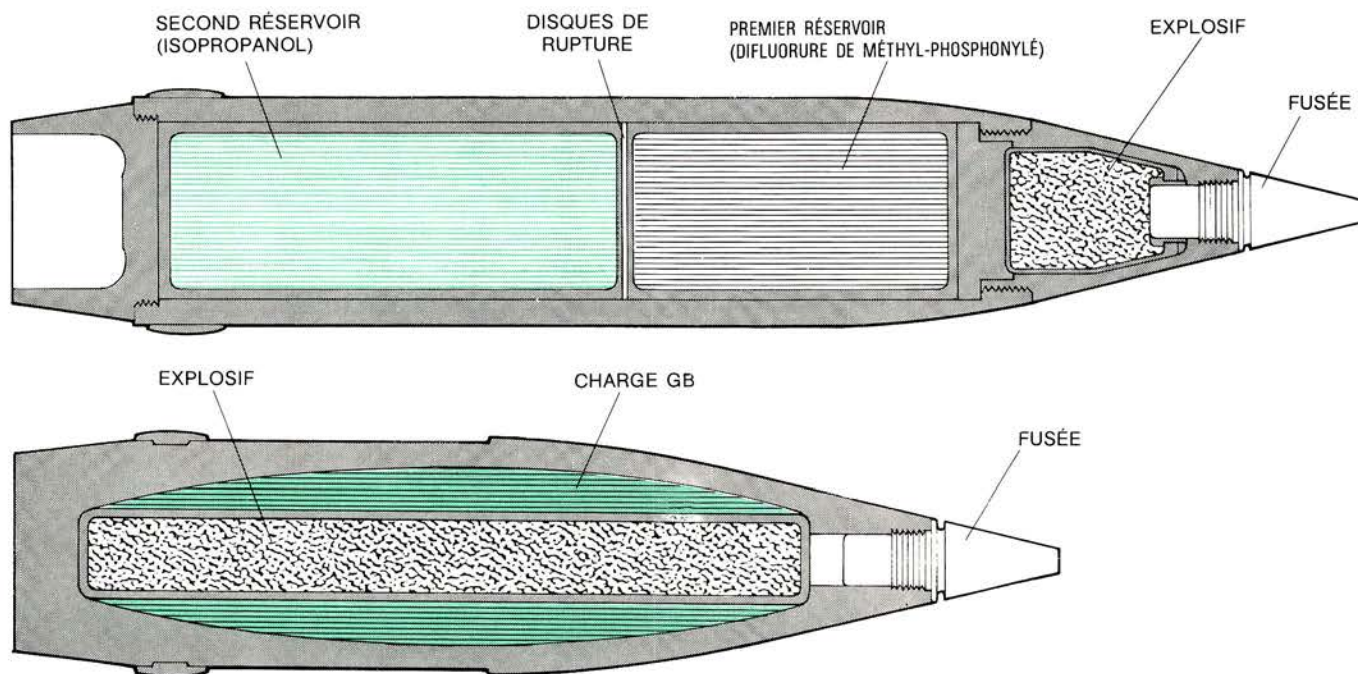
Les troupes de l'OTAN sont entraînées à mettre leurs masques et leurs équipements protecteurs dès que l'ordre leur en est donné ou quand certains symptômes caractéristiques apparaissent tels que des écoulements du nez, des troubles de la vue ou une sensation d'oppression

dans la poitrine. Le degré de protection nécessaire est indiqué par des détecteurs automatiques de gaz neurotoxiques disséminés sur le terrain. Un tel dispositif est d'une grande importance car les plus meurtriers des gaz neurotoxiques sont indétectables par les seuls sens humains. Un des appareils de détection les plus récents est un modèle britannique pesant 15 kilogrammes; l'alarme est déclenchée par une baisse de tension dans une cellule électrochimique où la cholinestérase (liée par des liaisons covalentes) est irriguée en permanence par une solution substrat de butyrylthiocholine; la présence de gaz neurotoxique inhibe l'enzyme (comme il le ferait dans le corps

humain), la concentration en thiocholine baisse et le signal d'alerte est déclenché.

Prévenir ou soigner l'empoisonnement

Les masques à gaz et les vêtements de protection protègent efficacement contre les gaz neurotoxiques. S'ils n'ont pas été utilisés, un autre moyen de défense individuel possible est l'utilisation d'antidotes : les antidotes sont indispensables lorsque l'équipement de protection n'a pu être revêtu assez vite ou lorsqu'il a été endommagé. On les utilisera encore dans le cas, plus rare, où la capacité



4. DEUX MODELES D'OBUS renfermant du gaz neurotoxique GB. En haut le projectile de 155 millimètres correspond à une nouvelle munition dite « binaire », qui est actuellement au point mais dont la production en série n'a pas été autorisée. En bas l'obus équivalent mais non binaire, actuellement stocké dans les entrepôts militaires. Dans la version binaire, un des deux réservoirs contenant un composant de l'agent GB peut être stocké et transporté indépendamment de la munition; dans ce cas, il n'est mis en place que sur le lieu de l'utilisation.

A la mise à feu, le contenu des deux réservoirs se mélange et c'est leur réaction qui produit l'agent létal. Le système binaire est une excellente sécurité contre toute émission accidentelle de gaz toxique. Dans le système non binaire, le corps de l'obus (qui est plus lourd) et la disposition centrale de l'explosif produisent un effet de fragmentation assez important. Bien que l'obus binaire comporte un volume plus important de matières chimiques, seulement 70 % de la charge se transforme en agent GB; le reste donne de l'acide fluorhydrique.

	OBUS NON CHIMIQUES		OBUS À GAZ NEUROTOXIQUES (TYPE GB)			
	OBUS À CHARGES FRAGMENTÉES	OBUS DE PUISSANCE À EXPLOSION AÉRIENNE	OBJECTIF : PERSONNEL NON PROTÉGÉ	OBJECTIF : PERSONNEL MUNI DE MASQUE À GAZ MAIS NE LE PORTANT PAS AU MOMENT DE L'ATTAQUE	OBJECTIF : PERSONNEL PORTANT DES MASQUES À GAZ MAIS PAS DE VÊTEMENTS DE PROTECTION	OBJECTIF : PERSONNEL PORTANT DES MASQUES À GAZ ET DES VÊTEMENTS DE PROTECTION
OBJECTIF : PERSONNEL OFFENSIF	1	4	1	2	74	LE POURCENTAGE DES PERTES NE DÉPAS- SERA EN AUCUN CAS QUELQUES POURCENTS
OBJECTIF : PERSONNEL DÉFENSIF	4	51	1	66	74	

5. NOMBRE DE SALVES que doit tirer un groupe de 18 obusiers de 155 millimètres pour infliger des pertes d'environ 30 pour cent à un objectif de l'ordre d'une section (répartie dans un rayon de 150 mètres) en terrain découvert et à une distance de 10 kilomètres. Le tableau indique les résultats avec deux catégories de projectiles, chimiques et non chimiques; il tient compte des différences entre les troupes offensives et les troupes défensives (position du soldat, cadence respiratoire, temps

nécessaire à la mise en place des masques). Les obus à charges fragmentées qui font partie des nouvelles armes appelées *Improved Conventional Munitions* ou ICM, explosent à environ 50 mètres du sol en lâchant une grappe de 88 grenades anti-personnelles. Pour les obus à gaz neurotoxiques, les effets destructeurs varient énormément avec les conditions atmosphériques. Ces chiffres sont des chiffres moyens : ils correspondent à un temps frais et sec avec une légère brise.

adsorbante des filtres et des vêtements protecteurs est dépassée et qu'on ne peut les remplacer. L'antidote le plus couramment utilisé est l'atropine, qui bloque l'acétylcholine sur les récepteurs autonomes; il agit généralement en conjonction avec un composé d'oxime qui déplace les gaz neurotoxiques de l'acétylcholinestérase inhibée; des auto-injecteurs compacts permettent de se faire une injection dès que l'on ressent les premiers symptômes d'empoisonnement. Le produit utilisé couramment dans les auto-injecteurs américains et soviétiques est connu sous l'appellation de TAB; c'est un composé de trimédoxine, d'atropine et de bényactysine, ce dernier produit étant un autre antagoniste de l'acétylcholine. Cet antidote est capable de sauver la vie à des personnes ayant reçu plus que la dose mortelle moyenne et il peut réduire considérablement les dommages causés par des doses sublétales (non mortelles).

Une intoxication plus forte, de l'ordre de plusieurs doses mortelles, ne peut être combattue qu'avec un appareil de respiration artificielle en surpression. L'emploi prophylactique d'oximes ou d'inhibiteurs d'acétylcholinestérase tels que le pyridostigmine, peut contribuer à améliorer la résistance aux gaz neurotoxiques; les pilules doivent être absorbées quelque temps avant l'exposition aux gaz. Mais en dépit des progrès toujours possibles dans la thérapeutique et la prophylaxie, il est douteux que la protection médicale puisse réduire de façon significative les pertes humaines.

La protection antichimique comporte un troisième volet qui est tout aussi important : l'équipement et les procédés de décontamination. Chaque combattant est normalement pourvu d'une trousse pour la décontamination de sa peau et de son armement individuel; mais il faut encore disposer de moyens collectifs pour décontaminer le matériel lourd, nécessaire à la poursuite du combat. Dans ce domaine, la priorité sera donnée aux équipements qui, par la densité de leur contamination, risquent de compromettre la manœuvre ou de contaminer des zones non atteintes. Un tel travail sera effectué au moyen d'appareils portatifs permettant d'appliquer l'agent décontaminant et de l'étaler sur les surfaces atteintes : poignées de portes, appareils de visée et de commande, passages obligatoires, etc. Les agents de décontamination utilisés sont des agents oxydants tels que le chlorure de chaux. Il existe aussi des équipements de décontamination très importants dans les grands centres logistiques et dans les zones de stationnement importantes. Les nations du pacte de Varsovie disposent d'un grand nombre de véhicules affectés à la décontamination chimique et à la



6. CETTE COMBINAISON DE PROTECTION contre une attaque chimique sera bientôt utilisée dans l'infanterie militaire américaine. Le masque à gaz, d'un nouveau modèle, est à un stade très avancé de mise au point; il comporte des filtres de charbon actif pour l'adsorption des gaz et des fibres de verre pour la rétention des particules. Le vêtement proprement dit est un survêtement en deux pièces, comportant plusieurs couches de tissu. Il est léger, étanche à l'eau et perméable à l'air. La couche de tissu extérieure est traitée chimiquement pour activer la fixation des gouttelettes du gaz neurotoxique et accélérer ainsi leur évaporation. La vapeur qui pénétrerait est adsorbée par une couche de charbon activé, plaquée sur le tissu intérieur. Pour une protection parfaite, le vêtement doit être porté avec des gants de caoutchouc au butyl et avec des bottes. Des bandes de papier adhésif servant à la détection sont fixées sur les bras, les poignets et les chevilles. Toutes les troupes américaines en Europe sont équipées d'un masque et d'un vêtement de protection.

décontamination radiologique; on cite-
ra parmi eux le TMS 65 qui est un
appareil applicateur à turbojet de
grand volume. Il a été utilisé pour la
première fois dans les années 1960 et
on le dit capable de décontaminer la
surface d'un char en quelques minutes.

Entraînement et organisation

Les nouveaux équipements de pro-
tection actuellement disponibles en
Europe accroissent considérablement
la valeur opérationnelle des forces de
l'OTAN en zone contaminée et
garantissent la continuité de l'appui
logistique et du ravitaillement. Mais
l'équipement n'est qu'une partie du
problème: l'efficacité de la défense
dépend fortement de la connaissance
des problèmes relatifs à la guerre
chimique et celle-ci ne peut s'acqué-
rir que par un entraînement intensif
du personnel et par une organisation
souple et bien adaptée aux conditions
chaotiques d'une guerre moderne,
conditions qui seraient encore aggra-
vées par des actions chimiques de
grande envergure.

Les grandes armées de l'OTAN et
celles du pacte de Varsovie prati-
quent un entraînement individuel contre
la guerre chimique; cependant,
certaines tâches ne peuvent être effec-
tuées que par un personnel spécialisé
disposant d'un équipement particu-
lier. Ces équipements sont d'ailleurs
les mêmes que ceux de la défense
biologique et de la défense radiologi-
que. Les trois fonctions (Atomique-
Biologique et Chimique) sont généra-
lement regroupées et désignées en
Europe par le sigle ABC. Aux États-
Unis, la défense ABC est assurée par
des équipes qui, à partir du niveau
de la compagnie, sont intégrées au
commandement. Une compagnie type
américaine, comprenant de 100 à
130 soldats, comporte une équipe de
défense ABC d'au moins 15 hommes;
quelques-uns sont des spécialistes et
les autres remplissent des fonctions
diverses dans la compagnie. L'équipe
comprend plusieurs groupes; l'un est
chargé de la détection chimique, un
autre du contrôle radiologique et un
troisième de la décontamination. Des
chimistes spécialisés sont affectés
aux brigades et aux niveaux supé-
rieurs; une compagnie ABC est affec-
tée à chaque division et une autre au
corps d'armée. L'organisation soviéti-
que est très semblable à celle de
l'Allemagne occidentale; elle met
l'accent sur les troupes de car-
rières spécialisées ABC qui consti-
tuent un corps indépendant. En
URSS, ce corps comprendrait envi-
ron 80 000 hommes.

Des exercices de défense antichimi-
que sont régulièrement effectués au
cours des manœuvres des forces rele-
vant du pacte de Varsovie. Ce fait
est connu de l'OTAN depuis le
début des années 1950 et les jour-

naux militaires soviétiques en font
d'ailleurs état. Des équipements pro-
tecteurs de différents modèles ont été
récupérés par les Israéliens lors de la
guerre des six jours en 1967; ils por-
taient tous des marques prouvant
qu'il s'agissait d'un matériel soviéti-
que standard. Des équipements identi-
ques ont été récupérés pendant la
guerre du Kippour. Dans aucun des
cas on n'a trouvé de munitions de
caractère chimique.

A la suite de ces constatations,
l'armée américaine a fait savoir en
1974 qu'elle allait accorder une prio-
rité nouvelle à la défense contre une
guerre chimique. Elle a effectivement
lancé un programme d'un milliard et
demi de dollars, lequel doit assurer,
aux environs de 1985, une capacité
très améliorée de résistance à une
attaque chimique et permettre de
poursuivre des opérations militaires
en environnement toxique. Des exerci-
ces en campagne sont effectués cou-
ramment, les soldats étant revêtus de
la tenue complète de protection chi-
mique. En même temps, l'armée de
l'Air américaine a lancé un program-
me estimé à 234 millions de dollars
pour améliorer la défense chimique
de ses bases aériennes en Europe: ce
programme sera achevé en 1984. De
telles mesures sont destinées à porter
la qualité de la protection antichimi-
que des forces américaines en Europe
à un niveau supérieur ou égal à celui
des forces de leurs alliés, qui tels la
Grande-Bretagne, le Canada, la
France et l'Allemagne fédérale accor-
dent depuis longtemps une forte prio-
rité à ce problème. L'OTAN lui-
même a lancé un programme d'unifi-
cation et d'amélioration de la défense
antichimique.

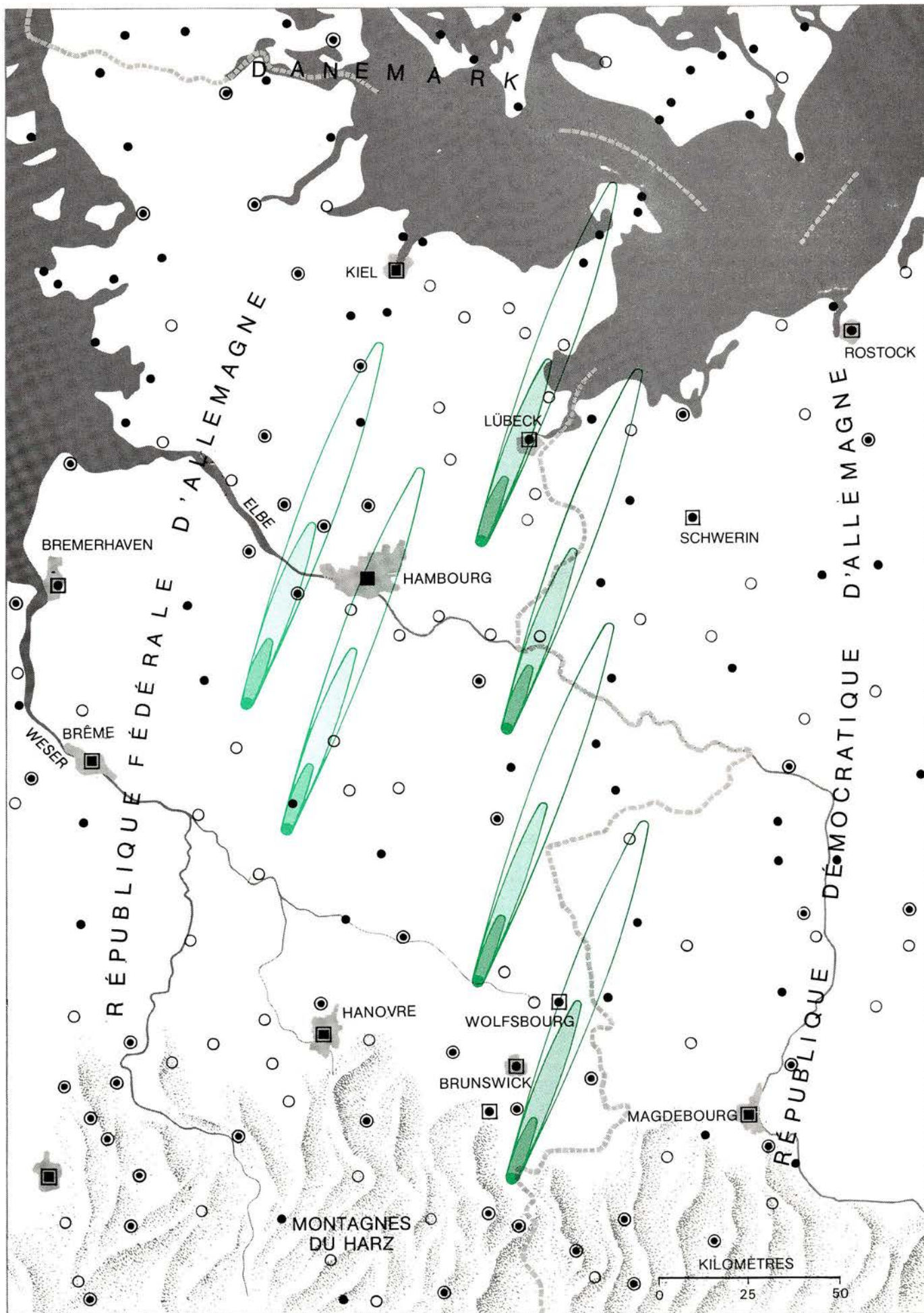
Effets militaires et civils

Même avec les moyens actuels de
protection très perfectionnés, une
attaque chimique bien conduite aura
chez l'adversaire un impact certain,
non seulement en raison des pertes
parmi les troupes non protégées,
insuffisamment instruites ou munies
d'équipements défectueux, mais aussi
par la diminution de l'aptitude au
combat qu'entraîne la prise des mesu-
res de protection. Cependant lors-
qu'une unité est bien protégée, l'atta-
que chimique est moins meurtrière
qu'une attaque classique. En dehors
de l'arme nucléaire, les armes en con-
currence avec les composés neurotoxi-
ques à caractère non persistant (tel
que le Sarin) sont, sur les troupes à
découvert, les lance-flammes, les
obus fusants de forte puissance et les
obus à charges fragmentées; sur des
troupes enterrées ce sont les nuages
explosifs. Pour ce qui est de l'« inter-
diction de zone », les composés chimi-
ques persistants (tels que le VX)
sont en compétition avec un grand
nombre de mines légères qui peuvent

être dispersées par l'artillerie. Les
comparaisons de rendement entre ces
différentes armes n'ont jamais été
poussées très loin; cependant, il exis-
te, pour chaque arme, des tableaux
donnant les quantités de munitions à
utiliser en fonction des objectifs à
atteindre. Pour des troupes non proté-
gées ou insuffisamment instruites, les
pertes causées par les armes chimi-
ques sont du même ordre de gran-
deur que celles provenant d'armes
conventionnelles. Mais pour une atta-
que sur des troupes entraînées et
munies d'une bonne protection anti-
chimique, les pertes infligées par les
armes modernes (surtout les nouvel-
les armes antipersonnelles) sont beau-
coup plus importantes. Les soldats
qui portent un bon équipement de
protection antichimique sont finale-
ment plus vulnérables à une attaque
de type conventionnel qu'à une atta-
que chimique. En outre, il faut tenir
compte du fait qu'au moins pour
l'OTAN, les sommes consacrées à

●	0-10 000 HABITANTS
○	10 000-25 000
◐	25 000-100 000
◑	100 000-250 000
■	250 000-1 000 000
■	PLUS DE 1 000 000

7. LES COURBES DE LA CARTE
ci-contre permettent d'évaluer l'importance
des pertes civiles qui résulteraient d'une
éventuelle attaque chimique sur un front situé
au Nord de l'Europe centrale. Les points
colorés représentent des objectifs de la taille
du bataillon (un kilomètre carré ou plus) qui
sont attaqués avec des bombes GB libérant
chacune six tonnes de gaz neurotoxique.
Cette quantité inflige 20 pour cent de pertes à
des troupes munies de masques mais ne les
portant pas au début de l'attaque. Le temps
est supposé frais, sec et couvert avec une brise
soufflant du Sud-Ouest. La plupart des habi-
tants dans la zone en couleur claire seront
atteints mais ne mourront pas; leur vision sera
affectée, ils souffriront des yeux, de maux de
tête et ressentiront une gêne respiratoire.
Dans les zones intermédiaires, les personnes
non protégées seront malades pendant plu-
sieurs jours. Les zones les plus foncées sont
celles dans lesquelles la population sera
sérieusement atteinte. Seules survivront les
personnes jeunes sur les bords extérieurs de la
zone mais la plupart perdront connaissance,
souffriront de convulsions et resteront en
danger de mort. Dans des conditions atmos-
phériques stables, par exemple la nuit par
temps clair, la surface des zones indiquées sur
la carte augmenterait. Dans des conditions
moins stables, par temps chaud et ensoleillé,
elles seraient plus réduites. Si dans la période
considérée il y a des changements dans la
direction du vent, l'allure des courbes est
modifiée. Les six attaques représentées sur
cette carte ne représenteraient qu'une fraction
infime du volume de gaz neurotoxiques qui
pourrait être déversé en Europe dans une
guerre à grande échelle.



l'armement chimique n'ajoutent rien à la puissance du feu, à moins que l'adversaire n'ait choisi d'utiliser l'arme chimique en premier.

La diminution de valeur opérationnelle qu'entraîne l'obligation de porter des équipements protecteurs est plus difficile à évaluer que l'effet meurtrier des armes chimiques. Pour mesurer cette diminution, des expériences à grande échelle ont été effectuées récemment aux États-Unis. Le port des vêtements de protection entraîne certes une certaine diminution du rendement mais on constate que l'ampleur de cette diminution dépend beaucoup du type de mission. C'est ainsi qu'on n'a constaté pratiquement aucune diminution du rendement au cours d'une expérience faite par les Britanniques sur une base aérienne en Allemagne, expérience où l'on mesurait des temps de rotation d'appareils d'appui tactique avec des équipages et un personnel au sol qui portaient des équipements de protection antichimique. En revanche on a constaté une perte d'efficacité d'environ 30 pour cent pour des missions en première ligne dont la nature n'a pas été précisée; c'est ce qui découle d'une déclaration faite devant le Congrès américain par un représentant du Secrétariat de la Défense.

Comme les civils ne seront jamais aussi bien équipés et aussi entraînés que les militaires, ils souffriront certainement plus des attaques chimiques. Les armes chimiques existant actuellement n'ont pas été conçues pour atteindre des objectifs stratégiques et la doctrine militaire n'envisage pas l'emploi de l'arme chimique contre les populations civiles. Mais on sait que les nuages de vapeur neurotoxiques seront entraînés par le vent sur de grandes distances avant d'être assez dilués et inoffensifs; en outre les sols contaminés peuvent être dangereux longtemps après la fin des combats. C'est pourquoi les armes chimiques utilisées sur le champ de bataille constituent un danger réel pour les populations avoisinantes. On estime que la contamination par le Sarin d'un objectif militaire, calculée pour provoquer 20 pour cent de pertes ennemies (du fait que les soldats ne portent pas leurs masques en permanence) peut dans des conditions atmosphériques normales pour l'Allemagne entraîner la mort de toutes les personnes non protégées situées sous le vent jusqu'à 20 kilomètres de distance du point de chute, et provoquer des intoxications graves jusqu'à 40 kilomètres. Lors d'une guerre chimique européenne, les pertes civiles se chiffraient par millions.

Outre le faible intérêt militaire des armes chimiques, il y a, au sein de l'OTAN, d'autres considérations d'ordre plus politique qui tendent également à limiter le déploiement de ces armes et à freiner leur emploi. Les

États-Unis et la France sont les seules nations parmi les alliés à posséder en propre l'arme chimique. L'Italie (comme la Bulgarie, la Hongrie et la Roumanie dans le pacte de Varsovie) est soumise à un traité international limitant son droit à acquérir des armes chimiques. L'Allemagne fédérale, soumise au même traité, a de toute façon renoncé à en posséder et c'est apparemment contre son gré qu'elle est, en Europe, le seul dépôt d'armes chimiques américaines. Dans un livre blanc, les forces d'Allemagne fédérale ont officiellement renoncé à utiliser le stock américain et refusé d'entraîner leurs unités combattantes à utiliser ces armes.

Armes chimiques et dissuasion

Les arguments en faveur d'un maintien des capacités de représailles chimiques de l'OTAN sont différentes selon que l'on pense que les Soviétiques utiliseront l'arme chimique comme complément d'une attaque conventionnelle ou dans le cadre plus large d'une guerre nucléaire. Dans le cas d'une attaque conventionnelle de grande envergure, une riposte de la même nature par les forces de l'OTAN semble nécessaire pour éviter une escalade et la guerre chimique. On estime par ailleurs que les représailles chimiques dont l'OTAN est capable sont suffisantes pour dissuader l'URSS d'utiliser l'arme chimique en premier. De plus, ce type de représailles, où l'on utilise une force déjà employée par l'adversaire, présente moins de risques d'escalade et, par conséquent, est plus crédible et donc plus dissuasif que l'arme nucléaire. On ajoutera qu'en cas d'échec de la dissuasion, les forces de l'OTAN pourraient éviter l'escalade de la guerre chimique (extension des actions en surface ou augmentation de leur intensité) ou y mettre fin en restant toujours à même de riposter au même niveau chimique, tant sur le champ de bataille que sur les arrières de l'ennemi.

La doctrine américaine sur l'emploi des armes chimiques est présentée dans les documents militaires sous la forme suivante : « L'objectif de la politique des États-Unis est de dissuader les autres nations d'utiliser l'arme chimique. Si la dissuasion échoue et que l'emploi des armes chimiques soit autorisé par les hautes instances nationales, l'objectif prioritaire est d'aboutir le plus vite possible à la fin des opérations de guerre chimique au plus bas niveau possible. »

Dans l'hypothèse différente où les armes nucléaires ont déjà été utilisées, l'intérêt anti-escalade d'une capacité de représailles chimiques n'existe plus. Le bénéfice que l'on peut tirer des représailles chimiques est alors uniquement fondé sur l'importance des pertes que l'on peut

infliger à l'ennemi sur le champ de bataille ou sur l'effet retardateur que l'on veut imposer à ses mouvements.

La valeur dissuasive et le potentiel de désescalade des armes chimiques de l'OTAN ont fait l'objet de nombreuses études tant sur leurs effets militaires immédiats que sur leurs conséquences stratégiques lointaines. Si les Soviétiques utilisent leur armement chimique en appui d'une offensive de type conventionnel, une riposte de même nature et au même niveau les obligera à prendre des dispositions antichimiques qui autrement n'auraient pas été nécessaires. Une telle contrainte peut avoir ou ne pas avoir des conséquences sur l'issue de la bataille, mais il est peu probable que l'agresseur considère cet inconvénient comme susceptible d'annuler les gains immédiats que procure le premier usage de l'arme chimique. Contrairement à l'action des représailles, l'offensive chimique initiale a de fortes chances de surprendre les forces adverses dans un état de préparation insuffisant et confère un avantage tactique considérable. On peut en déduire que les armes chimiques de l'OTAN n'auront un pouvoir vraiment dissuasif que dans la mesure où l'ennemi est menacé de représailles en escalade, c'est-à-dire de représailles suffisamment fortes pour percer ses lignes de défense sur un vaste front ou suffisamment profondes pour détruire des objectifs importants dans l'arrière-pays.

Cependant, de graves inconvénients accompagnent cette orientation escalatrice et diminuent sa crédibilité. Une riposte avec extension et intensification de la guerre chimique ralentirait nécessairement la contre-offensive de forces de l'OTAN et elle accroîtrait considérablement l'importance des pertes civiles. Des actions de guerre chimique à longue portée, dont les effets sont difficiles à prévoir et à contrôler, risqueraient de provoquer une contre-attaque nucléaire ou tout autre escalade que l'OTAN a intérêt à éviter ou tout au moins à en garder l'initiative. La décision d'user de telles représailles chimiques recouvrerait par ailleurs des objectifs déjà couverts par les forces nucléaires de l'OTAN; aussi la mise en place de l'armement correspondant risque-t-elle d'être interprétée par les autorités soviétiques comme le signe d'une certaine répugnance à utiliser l'arme nucléaire. C'est pourquoi l'adoption du principe de l'escalade chimique risque, en fin de compte, de diminuer la capacité de dissuasion des États-Unis.

De telles considérations ont un caractère purement académique du fait que les armes chimiques dont dispose l'OTAN en Europe ne permettent que des représailles limitées. Les principales nations alliées ont fait clairement savoir qu'elles ne désirent aucun accroissement du stock de

munitions chimiques en Europe, que ce soit sous contrôle américain ou sous contrôle national. Dans cette prise de position, des considérations de politique intérieure sont certainement intervenues mais il faut reconnaître que la mise en place des ressources nécessaires à l'expansion et à la modernisation des armes chimiques (par exemple le déploiement de munitions « binaires » en Europe) se ferait au détriment des programmes classés prioritaires par l'OTAN, tels que celui du renforcement des armes conventionnelles. On a également exprimé la crainte que l'emploi de moyens de représailles chimiques renforcés n'aboutisse à un blocage total du front (comme ce fut le cas pendant la Première Guerre mondiale) avec pour conséquence un accroissement considérable des pertes humaines et des destructions en Europe.

La politique du problème

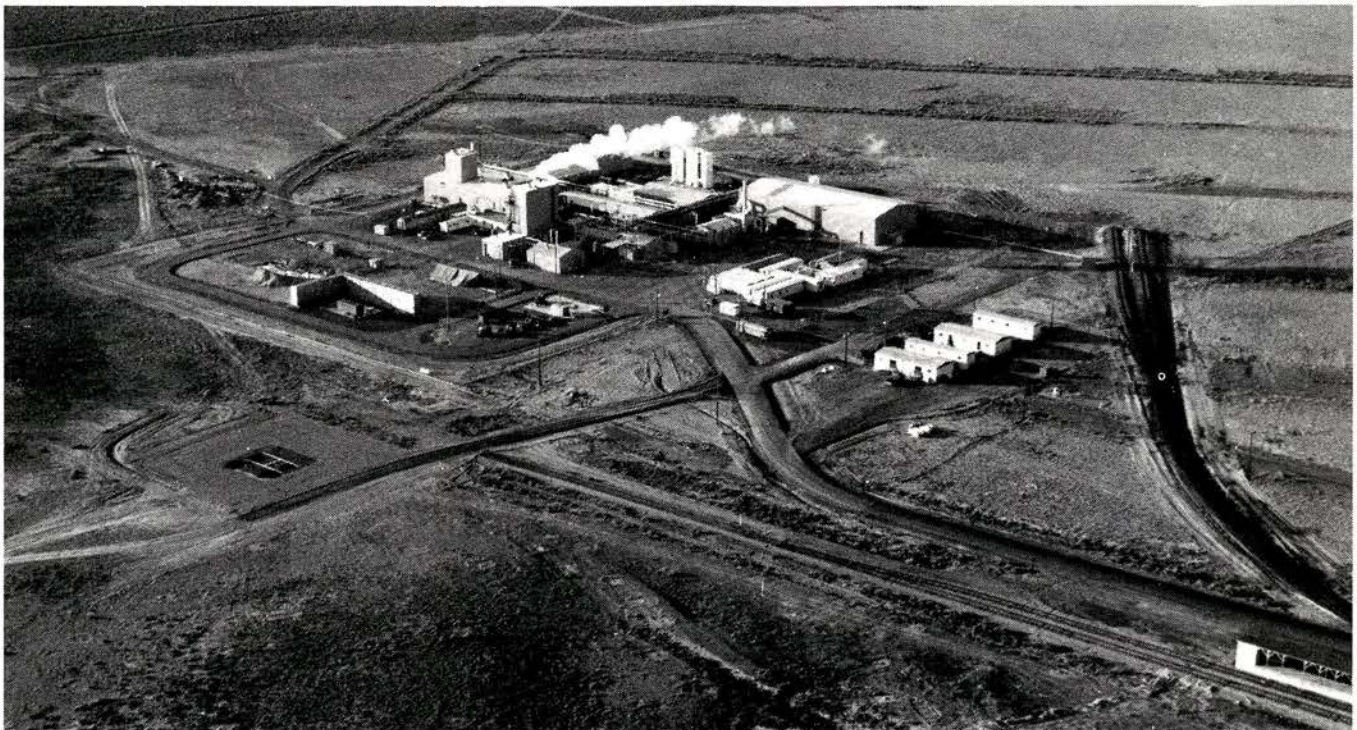
Vouloir conserver un potentiel de représailles chimiques et chercher à obtenir un accord sur la limitation de l'armement chimique sont en réalité deux aspects différents d'un même problème : réduire le plus possible la menace que représentent les armes chimiques de l'adversaire. Seule la limitation des armements permet, en réduisant les stocks, de mettre un terme à la surenchère des programmes militaires. C'est aussi la seule solution pour éviter la prolifération des armes chimiques et leur usa-

ge dans des conflits entre nations n'appartenant ni à l'OTAN ni au pacte de Varsovie. Les deux aspects du problème comportent cependant des risques propres. Conserver des armes chimiques en vue d'éventuelles représailles perpétue le risque existant et peut même l'aggraver. Signer un accord sur la limitation de ces armes peut, s'il n'est pas respecté, exposer l'OTAN à un danger accru. Dans chacun des cas, il faut tenir compte de considérations politiques qui n'ont rien de commun avec le problème purement militaire de l'efficacité de ces armes. D'un côté, il existe des limitations de nature politique aux mesures prises pour vérifier l'application d'un accord sur la limitation des armes; de l'autre, il y a des contraintes politiques qui pèsent sur la nature et sur la puissance des forces de représailles chimiques de l'OTAN. De telles limitations existent aussi bien dans l'opinion publique qu'au niveau plus élevé de la politique de défense des nations alliées, en particulier en Allemagne fédérale.

Néanmoins, deux facteurs importants laissent à l'OTAN une certaine souplesse pour définir sa politique concernant l'armement chimique. Le premier est la toute récente amélioration de la protection des forces alliées en Europe contre une guerre chimique. Ce facteur limite considérablement la menace que constituent les armes chimiques du pacte de Varsovie, dans le présent et même dans l'avenir (s'il y avait violation d'un

traité de limitation des armes chimiques). L'autre facteur est le très large éventail de moyens que représentent les armes conventionnelles modernes et les armes nucléaires, qui recouvrent et surclassent largement les armes chimiques pour la dissuasion et pour le combat. De telles considérations permettent de mieux définir les limites entre lesquelles doivent se poursuivre les négociations entre les États-Unis et l'URSS.

Au sommet de Moscou en 1974, les présidents Nixon et Brejnev ont proposé une initiative commune en vue de l'interdiction des armes chimiques. Cet accord fut confirmé par les présidents Ford et Brejnev à Vladivostok en novembre 1974. C'est ainsi qu'ont pu commencer en août 1976 les négociations de Genève. En août 1979, à la fin de la dixième session, on parvint à un accord sur les principes suivants : les armes chimiques mortelles et celles dites « incapacitantes » seront toutes deux incluses dans une convention générale d'interdiction des armes chimiques; par ailleurs, seront également interdits les produits chimiques fortement toxiques ainsi que leurs composants primaires, lorsqu'ils sont produits dans des quantités n'ayant d'autre justification que la guerre chimique et lorsqu'ils satisferont d'autres critères à définir pour les vérifications nécessaires. L'accord précise en outre qu'après notification de la convention, les états devront déclarer la situation de leurs stocks d'armes chimiques et faire connaître leurs



8. DES USINES DE DESTRUCTION des armes chimiques mises « hors de service », ont été récemment construites dans l'entrepôt militaire de Tooele. Dans cet établissement, l'agent GB est décomposé par hydrolyse dans une solution alcaline; l'agent VX est décomposé par chloration et le gaz moutarde est détruit par incinération. La

destruction des stocks d'armes chimiques mortelles classées « hors de service » est en cours; elle est prévue pour durer sept ans et ne concerne qu'un faible pourcentage du stock existant. Cette usine pourrait servir de prototype pour les installations de destruction, le jour où serait signé un traité international de désarmement chimique.

PLUS DE 155 000 ENTRÉES. LES TERMES DU LANGAGE DES AFFAIRES, DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE.

Porte ouverte sur la civilisation américaine et sur le monde anglo-saxon d'aujourd'hui, l'*American Heritage* est plus qu'un simple dictionnaire.

Dans ses deux mille pages, il offre :

- Dans la partie lexicale

Plus de 155 000 entrées.

Des définitions claires et précises ordonnées autour de l'emploi le plus fréquent.

Les étymologies de chaque terme (complétées en fin de volume par un lexique des racines indo-européennes).

Les noms propres.

Des milliers de mots nouveaux y compris les termes du langage des affaires, des sciences et de la technologie.

4 000 illustrations.

- Dans la partie "Information"

Un précis de grammaire.

Un guide de correspondance.

Un recueil des citations célèbres en Amérique.

Une chronologie de l'histoire des États-Unis, les principaux textes historiques (de la Déclaration d'Indépendance au discours d'entrée en fonction du Président Carter), accompagnés d'une abondante illustration.

Un atlas du monde.

Un lexique permettant de trouver le correspondant en espagnol, français, allemand et italien des mots anglais du vocabulaire courant.

Quatre lexiques (Espagnol/Anglais, Français/Anglais, Italien/Anglais, Allemand/Anglais).

**Le plus célèbre
dictionnaire américain
enfin diffusé en France**

**THE ILLUSTRATED HERITAGE
DICTIONARY
AND INFORMATION BOOK**
1 volume - 2 016 pages.



Demandez-le à votre libraire ou aux

Editions Belin

8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06
329-21-42

moyens de production; il précise également qu'au bout d'un certain temps, le contrôle des destructions effectuées reposera sur des dispositions de caractère national et international, prévoyant en cas de soupçon de violation des accords, la possibilité de procéder à une vérification sur place. Bien que ces accords constituent déjà un grand progrès, il faudra de dures négociations pour aboutir à un accord sur le détail des informations à fournir dans les déclarations de stocks et sur la délicate question des méthodes de vérification de la destruction des stocks et des moyens de production.

Les moyens nombreux et variés dont on dispose actuellement pour recueillir et évaluer de telles informations permettent de détecter les activités liées à la guerre chimique qui se déroulent dans les régions relevant du pacte de Varsovie. De tels moyens d'informations sont cependant considérés aux États-Unis et dans les pays de l'OTAN comme insuffisants pour garantir la bonne exécution d'un traité de désarmement chimique. Il n'est cependant pas indispensable qu'un système de contrôle soit à même de couvrir toutes les activités ayant un rapport avec la guerre chimique. Il faut seulement être certain de pouvoir détecter tout préparatif susceptible de présenter une menace sérieuse. On peut noter à ce sujet que la sensibilité nécessaire des mesures de vérification est grandement réduite quand on possède soi-même une bonne défense chimique. L'existence d'une bonne défense accroît le niveau de l'armement chimique que l'adversaire doit atteindre pour constituer une menace sérieuse. Cela rend plus difficile la dissimulation de tels préparatifs et réduit la nécessité de la vérification sur place.

Il subsiste certainement un certain nombre de divergences importantes dans les approches américaine et soviétique du problème des vérifications. Toutefois, les accords de principe sur la déclaration des stocks d'armes chimiques et de leurs moyens de production, et sur le caractère à la fois national et international des mesures de contrôle nécessaires, peuvent servir de base à un traité acceptable pour les deux parties. Une solution pour garantir la destruction des produits chimiques et des armements « déclarés », serait de les faire transporter en un lieu (ou en plusieurs lieux) choisi par la nation qui les possède; la destruction y serait faite en présence d'observateurs internationaux. Même par des procédés de destruction automatisés, cette procédure pourrait durer plusieurs années; pendant ce temps, chacun prendrait les dispositions nécessaires pour s'assurer que l'accord est bien respecté par le camp adverse. La démolition des usines de

production peut être contrôlée par satellite mais il aura été nécessaire de procéder avant à une visite sur place pour vérifier que les installations sont bien conformes aux déclarations. Par cette procédure, on garantirait l'élimination de grandes quantités d'armes chimiques et d'importantes usines de production. Il restera à vérifier qu'il n'existe pas d'autres armes ou d'autres moyens de production que ceux qui ont été officiellement déclarés. Ce problème devra être résolu par des visites sur place, analogues à celles prévues pour les établissements « déclarés »; elles seraient alors faites à la demande et concerneraient des installations considérées comme « douteuses ».

La valeur exemplaire des accords de limitation

La recherche du règlement politique de tous les problèmes liés à un accord sur la limitation des armes chimiques se poursuit à une cadence normale quoique cette cadence soit fortement influencée par le cours des relations internationales. Si les États-Unis et l'URSS parviennent à un accord bilatéral sur la guerre chimique, la démarche suivante sera bien évidemment de présenter à la Conférence du désarmement de Genève un projet d'accord multilatéral. Les négociations exploratoires sur le sujet et les études techniques qui durent depuis 11 ans pourraient aboutir à un traité qui aurait une large audience internationale; mais il faudra encore un certain temps avant que l'on sache de façon certaine si l'on aboutira à un succès ou à un échec. En attendant, les efforts déployés pour limiter la guerre chimique risquent de se relâcher et il se pourrait que des nations fabriquent et utilisent des armes chimiques. Ce risque a été mis en évidence par des informations non contrôlées, mais cependant troublantes, selon lesquelles des gaz toxiques auraient été utilisés récemment en Afghanistan et dans le Sud-Est asiatique.

L'enjeu de ces négociations dépasse le seul problème des armes chimiques. L'humanité vient d'entrer dans une période où la connaissance de la biochimie fondamentale et des processus cellulaires de la vie s'accroît de façon fantastique. Nos connaissances en ce domaine allant toujours plus avant, il en sera de même des applications que nous en ferons, pour le bien ou pour le mal. La signature d'un traité international de désarmement chimique, s'ajoutant à celui qui existe sur le désarmement biologique, constituerait un grand pas en avant et permettrait d'espérer que l'approfondissement des connaissances humaines sur les processus de la vie ira dans un sens bénéfique pour l'humanité. ■

Felix qui potuit rerum cognoscere causas*

VIRGILE/Géorgiques

*heureux celui qui a pu pénétrer la cause secrète des choses



HISTOIRE UNIVERSELLE DES NATIONS

3500 pages couleurs
200 cartes historiques
250 tableaux chronologiques
 et généalogiques
850 portraits



Pour bien comprendre le monde bouleversé où nous vivons, nous nous devons de connaître notre passé.

L'histoire permet d'exprimer, de situer, de vérifier les évolutions, de visualiser avec objectivité les réalités d'hier et d'aujourd'hui dans tous les pays, dans toutes les civilisations.

L'histoire des Nations transforme cette vaste entreprise en un plaisir. Sept volumes faciles à manier vous donnent une vision globale de l'histoire et vous aident à suivre la formation et

l'évolution de notre monde et de ses civilisations, de tout ce qui fit sa richesse, sa splendeur ou sa décadence...

Des ouvrages magnifiquement illustrés qui redonnent à l'histoire sa véritable dimension humaine, culturelle, scientifique, sociologique : soit au total 3500 pages tirées entièrement en couleur, au format 18 x 24 avec 200 cartes historiques, 250 tableaux chronologiques, 850 portraits et plus de 3000 documents couleur en grande partie inédits.

BON D'EXAMEN GRATUIT

à renvoyer à SOGECOR-ÉDITIONS TECHNIQUES B.P. 626 21016 DIJON CEDEX

Envoyez-moi le premier volume de l'Histoire Universelle des Nations pour un examen gratuit de 10 jours sans aucune obligation d'achat. Si je ne suis pas entièrement satisfait, je vous retournerai ce premier volume sans rien vous devoir. Si au contraire je désire le garder et réserver ainsi une collection, il me suffira de vous régler son prix.

- ☐ soit 182F comptant, frais d'envoi compris (prix total des 7 volumes 1274F frais d'envoi compris).
☐ soit en 2 mensualités de 91F pour chaque volume.

Vous m'enverez ensuite les 6 autres volumes au rythme d'un par trimestre que je vous réglerai après chaque réception au même prix que le premier.


 NOM : _____ PRÉNOM : _____

N° : _____ RUE : _____ CODE POSTAL : _____ VILLE : _____

Ed Techn RC Paris B552 029 431

SIGNATURE :
 (indispensable)

TACT PUBLIOTE S.A.

La mort subite du nourrisson

Un nourrisson apparemment en bonne santé meurt de façon tout à fait inattendue : ce drame est longtemps resté mystérieux et incompréhensible. De nouvelles données indiquent que, dans la majorité des cas, il s'agit d'anomalies du contrôle de la respiration.

par Richard Naeye

L'une des choses les plus effroyables qui puissent arriver à des parents est de perdre leur bébé par « syndrome de mort subite » : le nourrisson qui semblait en parfaite santé est trouvé mort dans son berceau. Ce phénomène, connu aux États-Unis sous ses initiales S.I.D.S. (pour *Sudden Infant Death Syndrome*), est défini cliniquement comme la mort soudaine et inattendue d'un enfant apparemment sain, dont l'autopsie de routine ne permet pas d'identifier la cause de la mort. On l'appelle également « mort du berceau » ou « mort du couffin » car la mort survient habituellement lorsque le bébé dort. Aux États-Unis ce syndrome tue 7 000 nourrissons par an (soit un bébé sur 500) ce qui en fait la cause de mortalité la plus fréquente entre un mois et un an. Dans de nombreux autres pays c'est également une cause fréquente de mortalité infantile. Pendant des années, ce drame est demeuré totalement mystérieux et incompréhensible. Aujourd'hui, un immense effort interdisciplinaire (qui se poursuit depuis huit ans) nous a apporté de précieuses indications sur ce syndrome; celles-ci laissent espérer que les victimes potentielles pourront être identifiées et qu'alors des mesures pourront être prises pour éviter le drame.

Les hypothèses sur les causes de ces morts subites sont nombreuses. Selon la plupart d'entre elles, la mort serait due à un phénomène soudain et catastrophique affectant un nourrisson par ailleurs bien portant. Jusqu'en 1972, l'hypothèse la plus répandue attribuait ces morts à une obstruction brutale des voies aériennes supérieures, survenant sans signe avant-coureur. Trois sortes d'arguments étaient avancés pour justifier cette explication : tout d'abord, l'inflammation et les ulcérations retrouvées sur les cordes vocales de quelques-unes des victimes prouvaient que les cordes s'étaient brutalement fermées, stoppant le flux d'air vers les poumons. (Ces dernières années on devait noter que ces signes étaient aussi fréquents chez les bébés qui

mourraient d'une cause connue que chez les victimes du syndrome de mort subite.) En outre, on avait noté depuis longtemps des pétéchies (de petites hémorragies) à la surface des poumons et d'autres organes du thorax chez plus de la moitié des victimes de ce syndrome. Avant 1972 on considérait les pétéchies comme une conséquence de la forte pression négative intra-thoracique provoquée par l'effort fait par les nourrissons pour lutter contre l'obstruction de la voie respiratoire. Des travaux récents de Warren Guntheroth de la Faculté de médecine de Washington ont montré qu'une obstruction des voies respiratoires ne provoquait pas, à elle seule, de pétéchies. Enfin, la troisième anomalie fréquemment rencontrée était la présence de liquide dans les alvéoles pulmonaires (mais cette donnée n'a pas de signification précise puisqu'elle n'est pas spécifique du syndrome de mort subite; de plus elle peut apparaître après la mort si un long intervalle de temps sépare la mort de l'autopsie).

Les premières recherches

Pendant des années, le syndrome de mort subite n'a soulevé que peu d'intérêt au sein du corps médical. En effet, les recherches sur ce sujet offraient un attrait restreint pour les expérimentateurs : le diagnostic ne pouvant être fait qu'après la mort, la plupart des moyens de recherche modernes, qui nécessitent des sujets vivants, étaient inutilisables. En outre, la majorité des chercheurs n'avaient jamais été confrontés avec ce syndrome ou ses conséquences, puisque les cas étaient immédiatement pris en main par la police, les juges d'instruction et les médecins légistes.

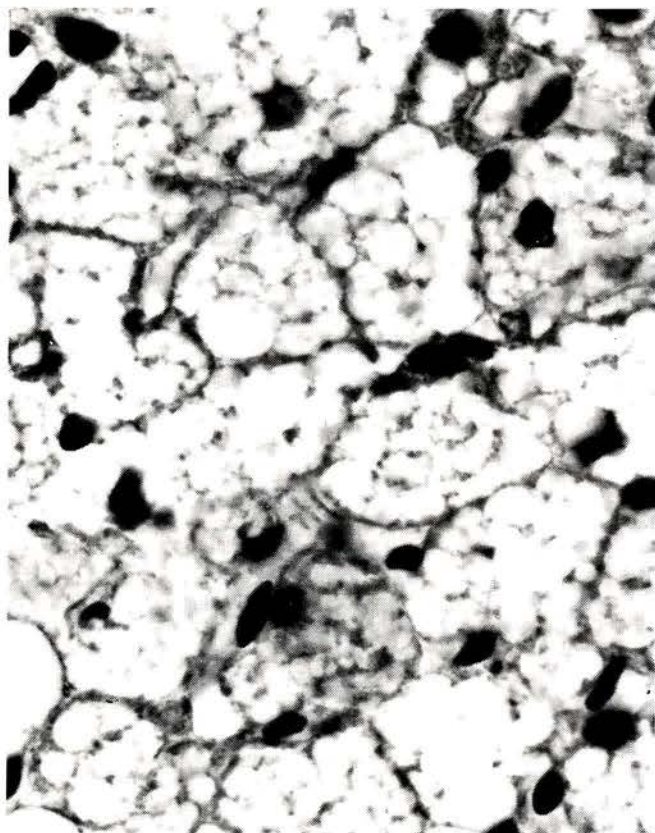
Cette période de « désintérêt » relatif prit fin le jour où des groupes de parents, qui avaient perdu leur bébé de cette façon, s'organisèrent au niveau national et firent pression sur le Service de Santé Publique améri-

cain pour encourager des recherches dans ce domaine. En 1972, Eileen Hasselmeyer de l'Institut de la Santé de l'Enfant organisa des séminaires dans le but de recruter des chercheurs venant d'horizons divers pour travailler sur ce syndrome. C'est ainsi que des physiologistes, des pédiatres, des spécialistes du comportement, des immunologistes, des biochimistes, des pathologistes, qui jusque-là ne s'étaient pas particulièrement intéressés à la mort subite du nourrisson, se mobilisèrent pour travailler sur ce sujet.

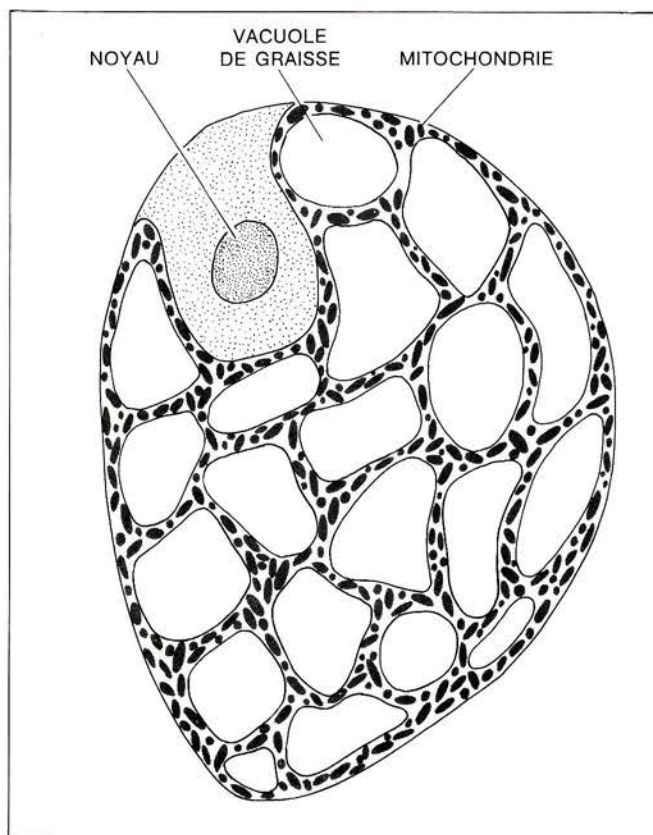
Les recherches épidémiologiques faites avant 1972 avaient révélé certains traits caractéristiques de ce syndrome de mort subite du nourrisson qui ne pouvaient pas être facilement expliqués par la fermeture brutale des voies respiratoires ou par la plupart des autres hypothèses avancées jusqu'alors. Ainsi ces décès ont une distribution en fonction de l'âge très caractéristique. Ils ne surviennent pas immédiatement après la naissance, mais apparaissent chez des bébés âgés de deux à trois semaines, atteignent un pic de fréquence vers trois mois pour décroître ensuite jusqu'à devenir rares après l'âge d'un an. La plupart des hypothèses avancées avant 1972 n'expliquaient pas non plus pourquoi la grande majorité des victimes mourraient pendant leur sommeil.

Certains des chercheurs recrutés en 1972 pensèrent que ces décès pouvaient résulter d'une anomalie dans le mécanisme de commande d'un des systèmes vitaux. L'attention fut très vite attirée sur la respiration lorsque Alfred Steinschneider fit un rapport sur les périodes d'apnées (arrêts respiratoires) prolongées pendant le sommeil, constatées chez plusieurs enfants ultérieurement victimes du syndrome. Il postula que les bébés étaient morts pendant une apnée. Son idée fut aussitôt appelée l'hypothèse de l'apnée.

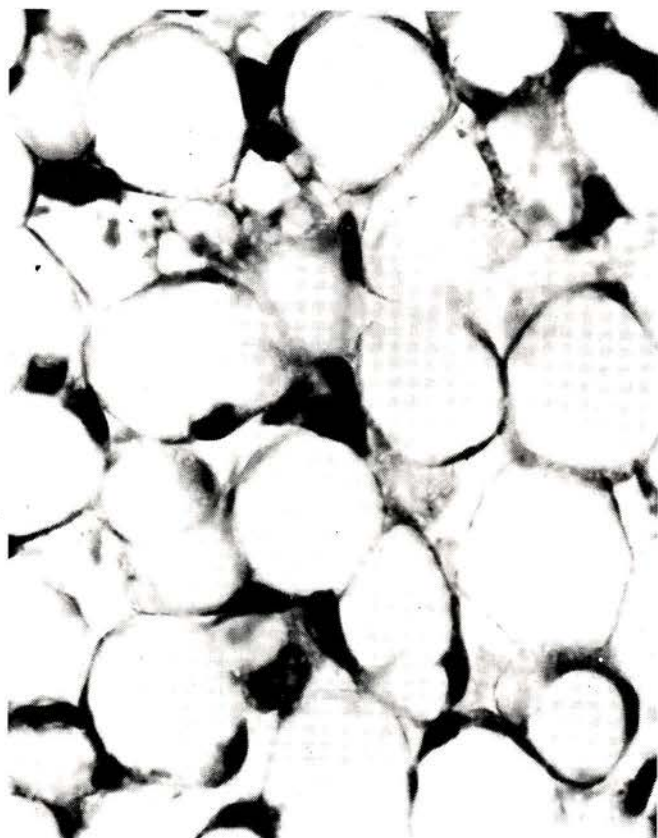
Elliot Weitzman de l'Hôpital Montefiore à New York et d'autres chercheurs firent remarquer que l'apnée du sommeil décrite par A. Stein-



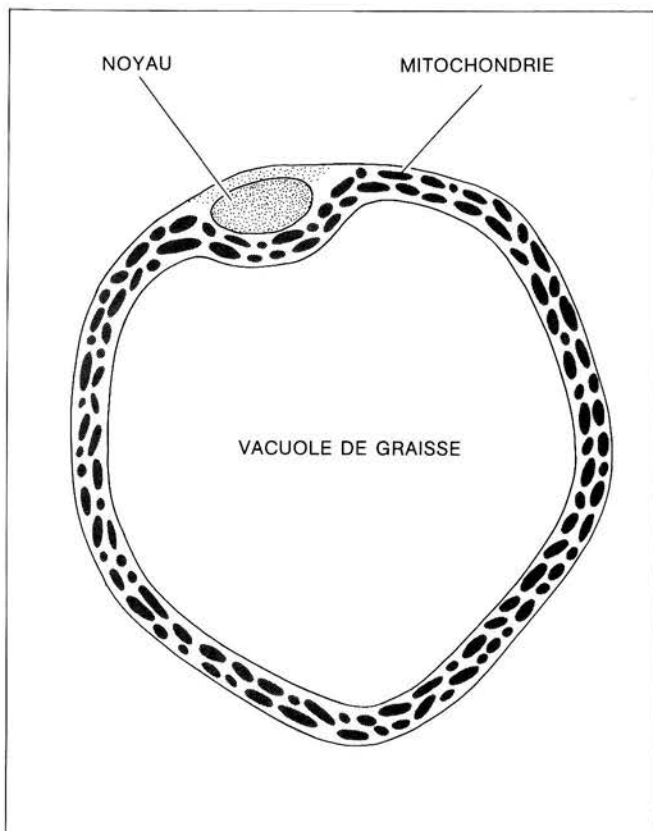
1. LA GRAISSE BRUNE est retenue jusqu'à un âge anormalement avancé chez un grand nombre de bébés victimes du syndrome de mort subite. La photographie de gauche représente (grossies 1 500 fois) les cellules d'un nourrisson mort du syndrome de mort subite à l'âge de



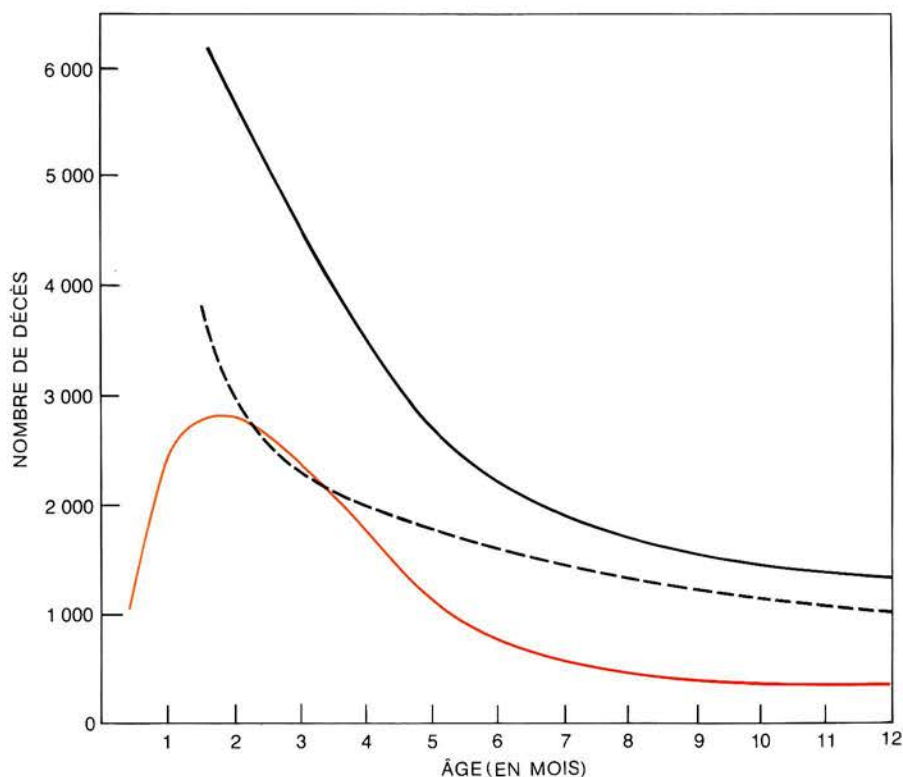
quatre mois. Les cellules rondes contiennent un réseau de mitochondries entourant de petites vacuoles de graisse, comme le montre le schéma de droite. Les mitochondries donnent à la graisse brune son aspect caractéristique.



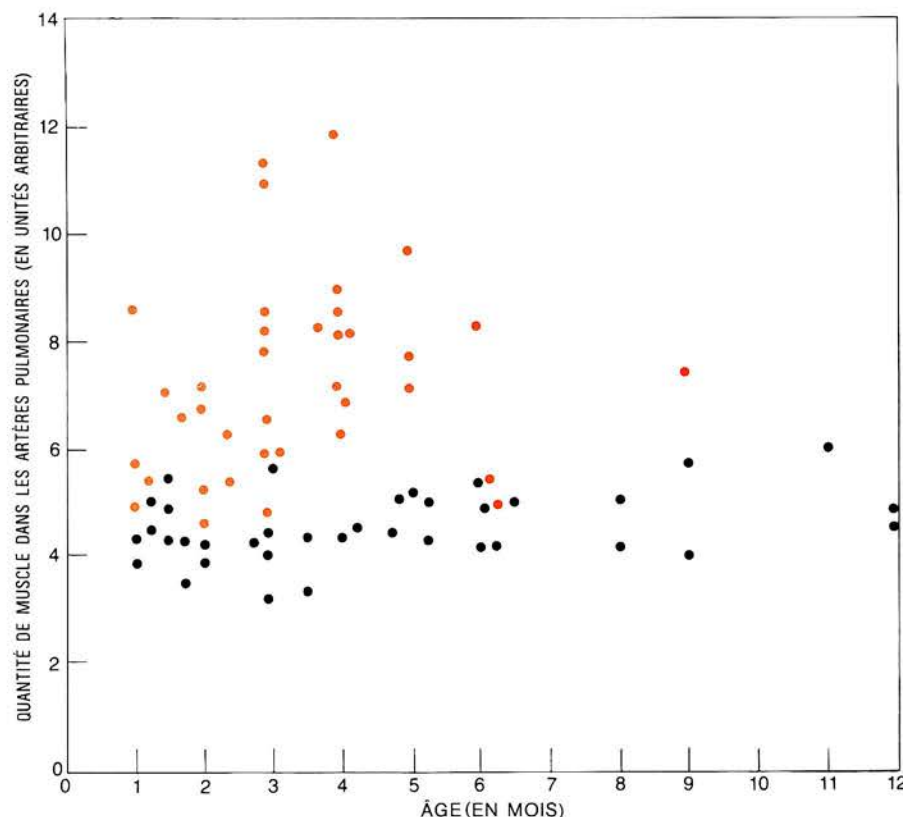
2. LES CELLULES GRAISSEUSES NORMALES sont représentées sur la photographie de gauche et sont schématisées à droite. Les cellules de la photographie sont celles d'un bébé qui mourut d'un accident à l'âge de quatre mois. La plupart des mitochondries ont



disparu. Leur rétention, chez de nombreux enfants morts du syndrome de mort subite, est probablement due à l'hypoxémie (diminution de la concentration d'oxygène dans le sang) secondaire à une hypoventilation chronique des poumons pendant le sommeil.



3. LE NOMBRE DES DÉCÈS par suite du syndrome de mort subite aux États-Unis est représenté par la courbe de couleur. Les décès dus à d'autres causes sont représentés par la courbe en pointillés noirs. La courbe noire en trait plein représente le nombre total de décès. Le syndrome est la cause de mortalité la plus fréquente entre un mois et un an, et vers trois mois, il provoque plus de morts à lui seul que toutes les autres causes.



4. L'HYPERTROPHIE MUSCULAIRE des parois des artères pulmonaires se retrouve fréquemment chez les victimes du syndrome de mort subite. Cette anomalie est figurée sur ce schéma qui représente la quantité de muscle des artères pulmonaires chez plusieurs nourrissons frappés de mort subite (points de couleur) et chez des sujets témoins, nourrissons morts d'autres causes (points noirs). On pense que l'augmentation de la quantité de muscles est due à l'hypoventilation chronique des poumons qui provoque une vasoconstriction artériolaire chronique, laquelle est responsable de l'hypertrophie musculaire.

schneider ressemblait à un état observé chez les adultes qui présentent des anomalies chroniques du contrôle de la respiration. Au cours du sommeil, ces adultes hypoventilent leurs poumons de manière caractéristique. Il semblait possible que les victimes de mort subite du nourrisson fissent de même.

Nous avons pensé qu'une telle hypoventilation devait laisser des séquelles anatomiques. Avec l'aide de Russel Fisher, nous avons recherché si les victimes de mort subite du nourrisson présentaient de telles séquelles. Nous avons rapidement découvert qu'environ 60 pour cent des victimes avaient une hypertrophie anormale du muscle des artérioles pulmonaires. Selon nous, cette hypertrophie était due à une hypoventilation pulmonaire chronique. L'hypoventilation réduit la concentration d'oxygène du gaz alvéolaire, provoquant ainsi la vasoconstriction artériolaire. Lorsqu'une hypoventilation chronique prolonge la vasoconstriction, le nombre des cellules musculaires des parois artérielles s'accroît (état connu sous le nom d'hyperplasie). L'hyperplasie accroît la résistance du système vasculaire au débit sanguin pulmonaire qui, à son tour, augmente la pression du sang dans le ventricule droit du cœur. Le cœur répond, comme les artères pulmonaires, par une hypertrophie du muscle de la paroi du ventricule droit. Ces anomalies des artères pulmonaires et du cœur échappèrent pendant longtemps aux recherches sur les cas de mort subite du nourrisson, car les études quantitatives nécessaires à leur reconnaissance ne font pas partie de l'autopsie de routine.

Caractéristiques du syndrome

L'hypoventilation, qui réduit la concentration d'oxygène du gaz alvéolaire, abaisse également la concentration d'oxygène dans le sang artériel qui irrigue le reste du corps. Cette diminution de la quantité d'oxygène dans le sang est appelée hypoxémie. Ses conséquences se retrouvent dans plus de la moitié des cas de mort subite du nourrisson : la première découverte fut la présence en quantité anormale de graisse brune. À la naissance, la graisse brune entoure certains organes vitaux; elle est particulièrement adaptée à la production de chaleur. L'abondance dans les cellules graisseuses de particules intracellulaires appelées mitochondries donne à la graisse brune son aspect caractéristique au microscope. La plus grande partie des mitochondries disparaissent au cours de la première année de la vie, après quoi les cellules perdent leur coloration brune et leur aspect caractéristique au microscope.

Chez les enfants qui souffrent d'une hypoxémie chronique après la naissance, ces cellules graisseuses conservent leurs mitochondries et leur couleur brune. On observe ce phénomène chez la moitié environ des victimes du syndrome de mort subite, ce qui suggère que les bébés ont eu de longues périodes d'hypoxémie avant leur mort. La plupart des victimes de ce syndrome présentent également une augmentation anormale du tissu de la glande surrénale qui fabrique l'adrénaline. L'augmentation de la production d'adrénaline par la glande surrénale peut expliquer la rétention de graisse brune chez les bébés qui meurent du syndrome, puisque la graisse brune réapparaît habituellement chez les adultes atteints d'une tumeur surrénalienne et qui ont par conséquent un taux élevé d'adrénaline dans le sang.

Les cas de mort subite font apparaître d'autres signes d'hypoxémie chronique : la production de globules rouges par le foie et l'augmentation de la production de la lignée rouge dans la moelle osseuse. (Normalement, le foie ne produit plus de globules rouges après la première semaine.) Ces effets sont probablement provoqués par l'hypoxémie, à laquelle le rein répond par la sécrétion d'érythropoïétine, l'hormone qui stimule la fabrication des globules rouges. Les victimes du syndrome de

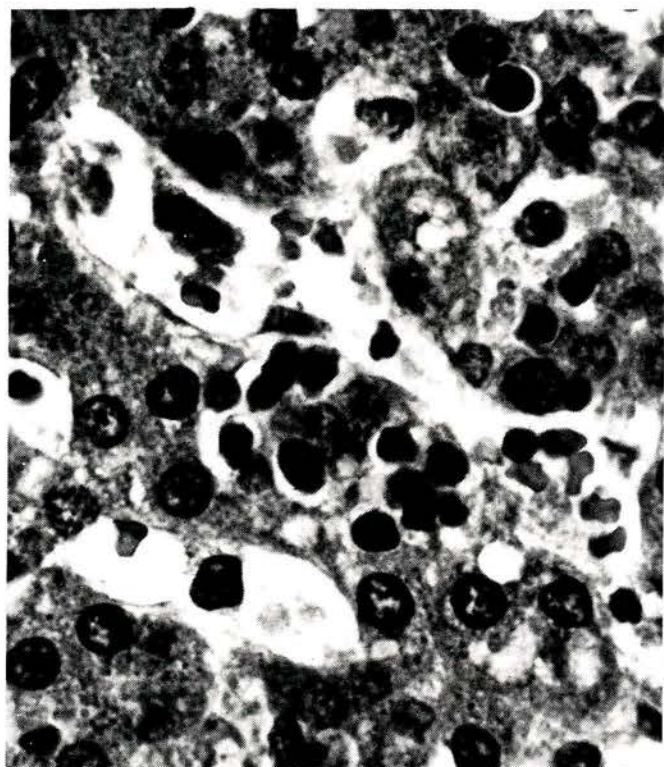
mort subite ne sont pas anormalement petits à la naissance mais ils ont souvent un retard de croissance après la naissance. Le développement des organes de ces enfants ressemble à celui que l'on observe expérimentalement chez des animaux maintenus dans un environnement pauvre en oxygène après la naissance; il ne ressemble en aucune façon au type de développement rencontré dans des conditions de dénutrition. Autre signe d'hypoxémie : on trouve, chez la moitié des enfants environ, une augmentation du taux de cortisol surrénalien; or, dans les conditions normales, le taux de cette hormone s'élève en réponse à l'hypoxémie et à d'autres formes de stress.

Les causes de la mort subite

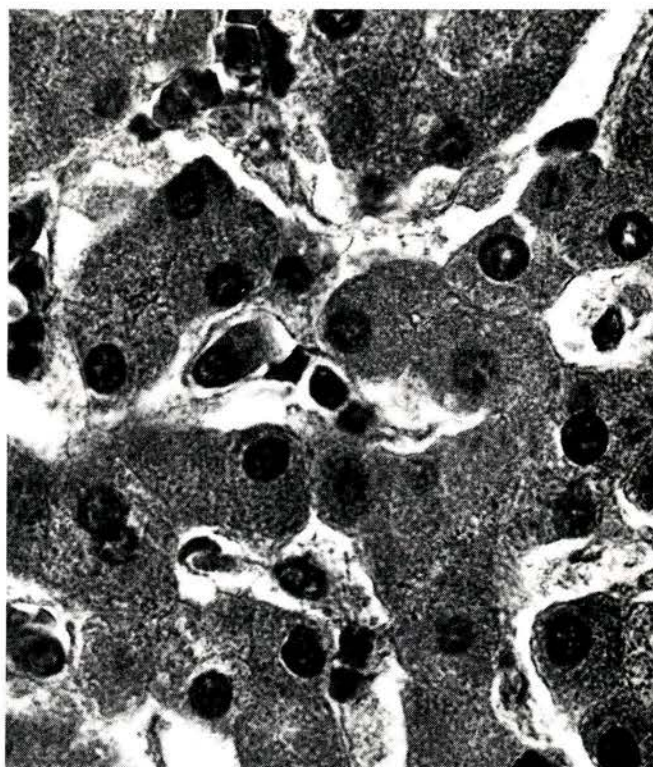
On est évidemment tenté de rechercher la cause de tant de signes d'hypoventilation précédant la mort de ces bébés. Des éléments semblent indiquer que l'hypoventilation résulte d'anomalies des mécanismes qui contrôlent la respiration. Outre A. Steinschneider, Daniel Shannon et Dorothy Kelly de l'Hôpital pour enfants de Boston ont également observé des apnées prolongées pendant le sommeil chez des enfants qui plus tard furent victimes du syndrome de mort subite; ces derniers

chercheurs ont aussi noté, chez ces mêmes enfants, une hypoventilation chronique et un amoindrissement des réponses à l'inhalation de taux croissants de gaz carbonique. Cet élément suggère que ces bébés ont des anomalies des centres de contrôle du tronc cérébral, qui, normalement, répondent à l'accumulation de gaz carbonique par une augmentation de l'amplitude et de la fréquence respiratoire.

On a récemment trouvé des explications à la survenue plus fréquente de ce phénomène de mort subite au cours du premier mois de la vie. David Read à Sydney (Australie), Charles Bryan et Elliott Phillipson à la Faculté de médecine de Toronto ont montré que, pendant les premiers mois, certains mécanismes contrôlant la respiration ne fonctionnent pas de la même manière que pendant le reste de la vie. Chez les nourrissons âgés d'un à six mois, les poumons sont partiellement collabés pendant la phase de sommeil avec mouvements oculaires rapides (sommeil paradoxal), parce que cette phase est aussi celle du relâchement total des muscles intercostaux qui contrôlent le thorax. Si le diaphragme cesse aussi ses mouvements, de sorte que la respiration est interrompue pendant la phase de sommeil paradoxal, il ne reste plus qu'une petite quantité d'air résiduel pour l'échange normal



5. UNE ANOMALIE DE LA PRODUCTION de globules rouges est détectée chez plusieurs bébés morts brutalement et inopinément. La zone elliptique légèrement à gauche du centre, sur la photographie de gauche, montre des cellules précurseurs des globules rouges au niveau du foie, chez une victime de quatre mois morte du syndrome de mort subite. La microphotographie de droite représente une coupe du foie d'un enfant du même âge mort d'une autre cause : on n'y retrouve pas de



précurseurs des globules rouges. La moelle osseuse accroît également sa production de globules rouges chez de nombreux bébés morts du syndrome de mort subite. Ces anomalies surviennent probablement à cause de la diminution de la concentration en oxygène dans le sang : celle-ci entraîne, au niveau du rein, la sécrétion d'érythropoïétine, hormone qui, à son tour, stimule la production des cellules de la lignée rouge.

d'oxygène et de gaz carbonique. Une hypoxémie apparaît alors en quelques secondes. Un adulte, en revanche, peut cesser de respirer trente à quarante secondes sans développer d'hypoxémie sévère.

Lorsque les mouvements respiratoires diminuent ou s'arrêtent, les mécanismes réflexes qui les augmentent ou les font « repartir » chez les enfants plus âgés, sont notablement moins actifs chez les tous jeunes nourrissons. La survie de ces enfants dépend par conséquent d'un réflexe les faisant sortir de cette phase de sommeil avec mouvements oculaires rapides, et d'une mise en route des mécanismes du tronc cérébral qui relancent la respiration. Le corpuscule carotidien, petit organe qui se trouve dans le cou, joue un rôle important pour ces deux fonctions. Or, notre groupe de recherches découvrit, en 1976, que plus de la moitié des victimes du syndrome de mort subite avaient un corpuscule carotidien peu développé. Si cet organe ne fonctionne pas normalement, le nourrisson peut ne pas être capable de relancer sa respiration lors d'une apnée prolongée. Les bébés frappés de mort subite qui ont des corpuscules carotidiens peu développés montrent également, à l'autopsie, les signes d'hypoventilation chronique et d'hypoxémie décrits précédemment.

Pourquoi le corpuscule carotidien est-il peu développé chez autant de victimes du syndrome? Cela est peut-être dû à une stimulation insuffisante du corpuscule carotidien par les influx nerveux venant des centres cérébraux du contrôle de la respiration. On peut alors se demander si

ces centres sont structuralement normaux. On n'a pas encore pu réaliser d'études anatomiques précises de ces centres, car ceux-ci ont une structure très complexe et de plus sont étroitement liés à d'autres centres qui commandent d'autres fonctions vitales. L'anomalie que l'on pourrait éventuellement découvrir dans les centres du contrôle de la respiration est probablement discrète car un nourrisson porteur de graves anomalies à ce niveau ne pourrait survivre après la naissance.

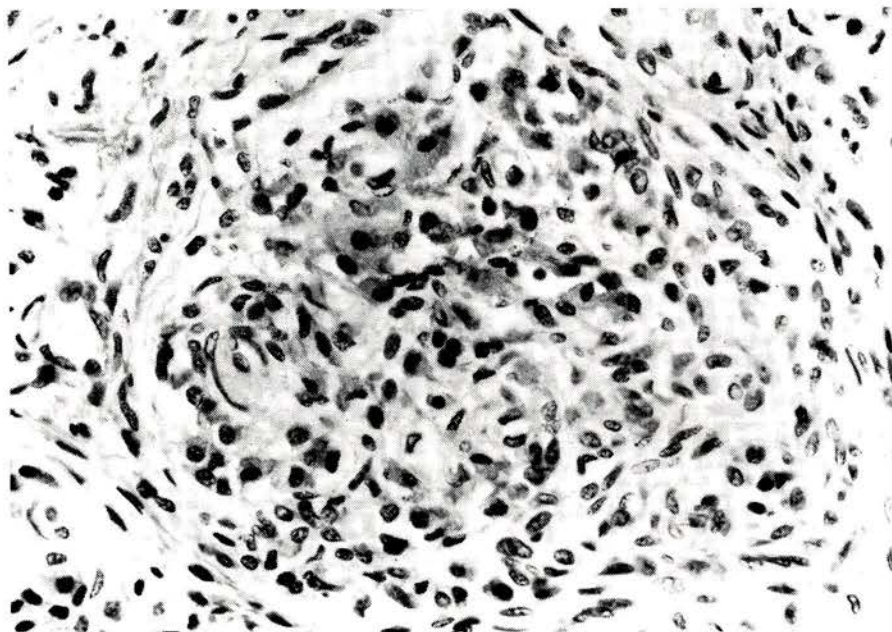
En 1976, notre groupe de recherche découvrit que la moitié environ des nourrissons frappés de mort subite présentaient une prolifération anormale des fibres astrocytaires dans la formation réticulée latérale du tronc cérébral. Cette formation est un centre-clé du contrôle respiratoire, de sorte qu'il serait tentant d'interpréter la prolifération astrocytaire comme la preuve d'une atteinte des mécanismes régulateurs de la respiration. Mais cette interprétation semble incorrecte car on retrouve cette prolifération dans d'autres régions du tronc cérébral chez les victimes du syndrome. De plus, cette prolifération peut se développer du fait d'une hypoxémie chronique. Sachio Takashima et ses collaborateurs de l'Hôpital des enfants malades de Toronto, ont récemment découvert que chez les bébés frappés de mort subite la prolifération astrocytaire est plus importante dans les parties du cerveau où la circulation collatérale est la moins développée. Ces découvertes renforcent l'hypothèse d'une prolifération astrocytaire due aux lésions créées par l'hypoxémie.

John Emery et ses collaborateurs, à Sheffield (Grande-Bretagne), ont observé des cellules nécrophages chargées de graisse dans le liquide céphalo-rachidien de la moitié des victimes qu'ils avaient étudiées. Cette graisse paraît provenir de la nécrose du tissu cérébral. L'hypoxémie pourrait être la cause de cette nécrose.

John Olsson a récemment découvert que la région du tronc cérébral commandant la langue présentait une diminution significative du nombre de neurones, ou cellules nerveuses, chez beaucoup de victimes de mort subite. Chez l'adulte, il existe un syndrome caractérisé par une apnée pendant laquelle la langue tombe en arrière et obstrue la voie respiratoire supérieure pendant le sommeil. Il reste à vérifier si la langue participe aussi à l'obstruction de la voie respiratoire à la fin de périodes d'apnée, chez certains nourrissons sujets aux apnées.

Les centres du tronc cérébral qui contrôlent la respiration sont très proches des structures qui contrôlent les autres fonctions de l'organisme; par suite, tout dommage altérant les mécanismes du contrôle respiratoire pourrait aussi affecter ces autres fonctions. On a découvert des affections non respiratoires chez quelques-uns des enfants morts du syndrome de mort subite. Ces anomalies comprennent des troubles de la régulation de la température, de l'alimentation, du tonus musculaire et des réflexes nerveux apparaissant aussitôt après la naissance. Plusieurs parents de bébés frappés de mort subite ont déclaré que leurs enfants avaient un cri anormal depuis la naissance: les enregistrements de plusieurs de ces cris confirment leur caractère particulier. En dehors du travail de John Olsson, peu d'efforts ont été faits pour corréler, chez les enfants frappés de mort subite, les anomalies non respiratoires observées avec des lésions spécifiques du cerveau.

D'après les enquêtes que nous avons réalisées auprès des parents, il semble que la majorité des bébés frappés de mort subite aient eu des réactions moins marquées aux divers stimulus de l'environnement que leurs frères et sœurs au même âge. Ces caractéristiques comportementales étaient plus particulièrement nettes chez les victimes de mort subite présentant une hypertrophie musculaire des artères pulmonaires ainsi que d'autres signes post-mortem d'hypoventilation pulmonaire chronique et d'hypoxémie. Il se pourrait donc que ce type de comportement résulte d'une atteinte même minime du cerveau, causée par l'hypoxémie. La possibilité d'une telle affection est apparue après une étude réalisée dans notre laboratoire, qui mit en évidence un retard de myélinisation



6. L'INSUFFISANCE DE DEVELOPPEMENT DU CORPUSCULE CAROTIDIEN est un autre signe couramment retrouvé chez les victimes de mort subite du nourrisson. Ce corpuscule, la structure grossièrement circulaire qui occupe la plus grande partie de la photographie, est représenté ici avec un grossissement de 420. Un corpuscule carotidien normal, représenté à la même échelle serait beaucoup plus gros. Les corpuscules carotidiens (un de chaque côté du cou) interviennent dans le contrôle de la respiration.

dans deux régions du tronc cérébral chez ces enfants. (La myéline est une gaine graisseuse qui permet la conduction des influx électriques le long des fibres nerveuses.) Tout retard de myélinisation pourrait ralentir la maturation de certaines fonctions cérébrales.

Plusieurs chercheurs ont suggéré que ce « schéma comportemental » pouvait être dû à une insuffisance des taux de neurotransmetteurs, les médiateurs de la conduction des influx d'un neurone à l'autre. Or John Connor, pharmacologiste dans notre institution, a mesuré les taux de noradrénaline, de sérotonine et de dopamine dans diverses zones du cerveau des enfants frappés de mort subite; il ne trouva aucune anomalie quand il compara ces taux à ceux d'enfants morts par accident.

Origine génétique ou acquise?

Si les anomalies primitives responsables de la mort subite du nourrisson siègent souvent dans le tronc cérébral ou les corpuscules carotidiens, on peut se demander à quel moment ces organes sont atteints. Certains dysfonctionnements observés chez les bébés qui meurent du syndrome sont visibles aussitôt après la naissance. Les lésions ou affections primitives pourraient être, par conséquent, d'origine génétique ou bien résulter de lésions survenues pendant la grossesse, le travail ou l'accouchement. Les résultats que nous avons rassemblés au cours d'une vaste étude n'apportent aucun indice prouvant que les enfants frappés de mort subite présentaient, par rapport aux bébés qui ne mouraient pas, une fréquence plus élevée d'hypoxémie, de lésion due aux anesthésiques, ou de traumatismes survenus avant ou pendant l'accouchement. Ceci tendrait à prouver que certaines des anomalies cérébrales rencontrées chez les victimes du syndrome auraient une origine génétique ou apparaîtraient au cours de la période fœtale. Cependant, le syndrome de mort subite du nourrisson ne se retrouve que rarement dans la même famille et les enquêtes publiées n'ont pas permis de découvrir d'anomalies du contrôle de la respiration dans les familles des victimes.

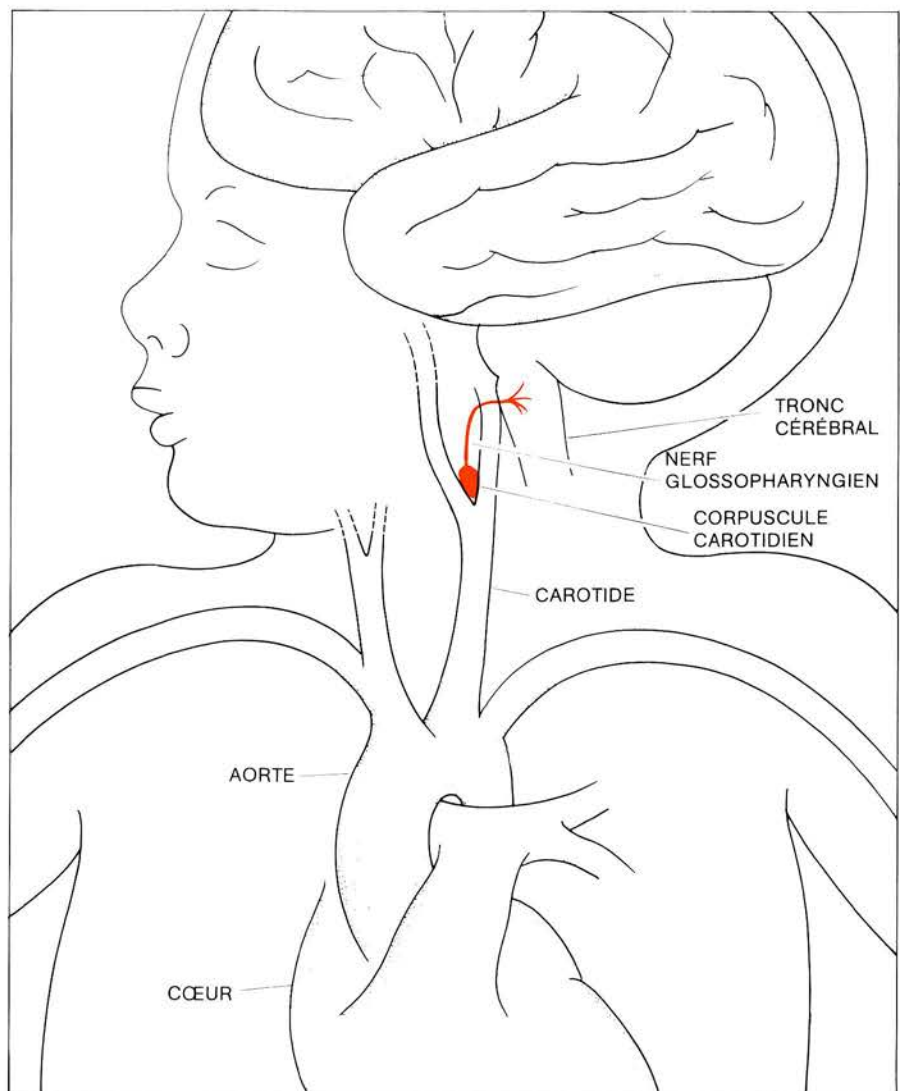
On peut citer d'autres arguments plaidant en faveur d'une origine acquise plutôt que génétique de ce syndrome. Ainsi, Donald Peterson de l'Université de Washington a montré que la fréquence de mort subite du nourrisson n'était pas plus élevée chez les cousins germains que dans l'ensemble de la population. Il a aussi montré que lorsqu'un jumeau meurt du syndrome de mort subite, la probabilité pour que l'autre jumeau en meurt est seulement de cinq à huit pour cent, et ceci indépen-

damment du fait qu'il s'agisse de vrais ou de faux jumeaux. Ce faible taux signifie que l'origine génétique du syndrome est tout à fait improbable dans la plupart des cas.

Bien que le taux de corrélation entre les jumeaux soit beaucoup trop bas pour confirmer l'hypothèse d'une origine génétique, il est cependant bien plus élevé que le taux d'incidence du syndrome dans la population en général. Il est donc possible que si les deux jumeaux meurent, c'est parce qu'ils partagent tous deux un environnement prédisposant. Grâce aux résultats de notre étude, nous avons récemment identifié six facteurs qui semblent être en relation avec la mort subite du nourrisson. L'un de ces facteurs présente un caractère génétique; quatre sont liés à la grossesse. Le facteur génétique est le groupe sanguin B chez l'enfant et les facteurs liés à la grossesse sont respectivement: (1) l'infection bactérienne du liquide amniotique, (2) l'anémie

chez la mère, (3) la consommation par la mère de cigarettes ou (4) de barbituriques. Le sixième facteur est la promiscuité dans un habitat trop petit.

Quatre de ces six facteurs lèsent directement le fœtus ou accroissent le risque de lésion de celui-ci. L'infection bactérienne du liquide amniotique est une cause directe ou indirecte de lésion cérébrale chez certains nourrissons. La consommation de cigarettes par la mère réduit l'apport de sang au placenta et retarde la croissance du fœtus. On sait que les barbituriques retardent sélectivement la croissance du cerveau chez les rats nouveau-nés. D'autre part, il y a corrélation entre une grave anémie chez la mère au cours de la grossesse et un taux élevé de mortalité fœtale et néo-natale. Le groupe sanguin B chez un enfant est un facteur à haut risque de mise au monde d'un enfant mort-né, et de mortalité néo-natale dans nombre d'affections non liées



7. LA DISPOSITION ANATOMIQUE DES CORPUSCULES CAROTIDIENS est schématisée sur cette figure. Les anomalies carotidiennes, que l'on retrouve souvent chez les victimes du syndrome de mort subite, ont conduit à des travaux de recherche sur des anomalies de structure des centres cérébraux du contrôle de la respiration. Ces efforts n'ont pas abouti en raison de la proximité anatomique de ces centres avec d'autres centres commandant d'autres fonctions vitales.

au syndrome de mort subite du nourrisson. D. Peterson a observé que le syndrome avait une fréquence particulièrement élevée lorsque les mères avaient eu plus d'une grossesse. Le facteur environnemental spécifique responsable reste à déterminer.

De nombreux autres facteurs associés au syndrome paraissent perdre leur caractère de facteur à haut risque en l'absence d'infection du liquide amniotique. Ces facteurs comprennent la prématurité, le fait pour l'enfant d'être de sexe masculin, de milieu pauvre, de mère peu cultivée ou ayant effectué peu de visites médicales prénatales ou encore possédant des antécédents d'avortements spontanés.

Dans notre étude, tous les cas de mort subite liés à la promiscuité dans l'habitat ont révélé à l'autopsie la présence d'une infection discrète des voies respiratoires. Plusieurs travaux ont montré que les infections des voies respiratoires augmentaient la fréquence et la durée des apnées chez les enfants sujets aux apnées.

Même si les six facteurs que nous avons identifiés contribuent à la genèse du syndrome de mort subite, ils n'expliquent qu'environ un tiers des décès. Cependant, ils ont une signification très importante : ils indiquent en effet que la vie fœtale constitue un terrain privilégié pour la poursuite de recherches sur les origines du syndrome. Il est intéressant de noter que le tronc cérébral est une cible particulièrement vulnérable

pour des lésions éventuelles au cours de la vie fœtale car il est le siège d'une activité métabolique plus intense que les autres parties du cerveau. Le tronc cérébral est susceptible d'être lésé de façon spécifique, par la diminution des taux d'oxygène ou de glucose dans le sang.

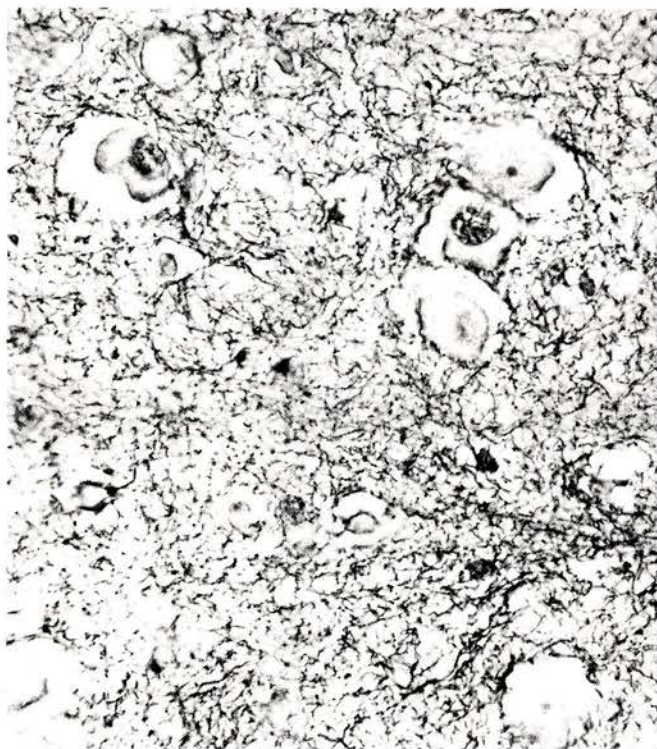
Les autres causes possibles

Bien que de nombreux indices semblent confirmer l'hypothèse de l'apnée de Steinschneider, celle-ci ne suffit pas pour expliquer tous les cas de mort subite. En effet, un tiers des victimes ne présentent à l'autopsie aucun des signes qui suggèrent une hypoventilation pulmonaire ou une hypoxémie chronique avant la mort. Des centaines d'hypothèses ont été avancées pour expliquer ces morts, mais elles ne reposaient souvent sur aucune donnée chiffrée ou reposaient seulement sur des données fragmentaires sans étude suivie. Malgré cette confusion, on a pu trouver des indices concernant des mécanismes non respiratoires dans des cas de mort subite du nourrisson. Ainsi, une bradycardie (c'est-à-dire une fréquence cardiaque anormalement lente) et des troubles graves du rythme cardiaque ont été observés occasionnellement pendant les périodes d'apnées chez des nourrissons endormis. Ces découvertes laissent entrevoir qu'une arythmie cardiaque soudaine, avec ou sans apnée, pourrait être la cause

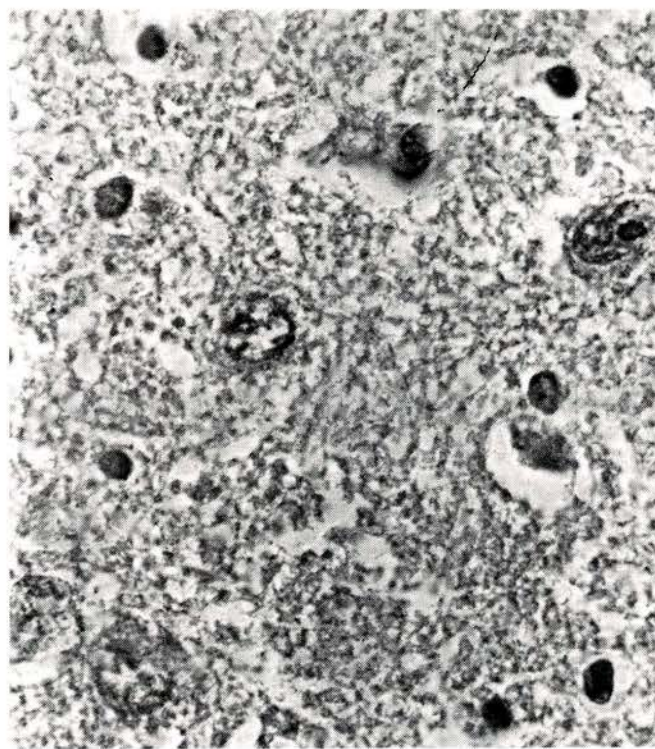
de la mort dans certains cas. L'hypothèse est plausible, mais les chercheurs travaillant sur le sujet ont été terriblement handicapés par l'impossibilité d'étudier les victimes avant leur mort. De plus, les recherches sur l'existence d'anomalies cardiaques dans les familles des bébés atteints n'ont pas été concluantes.

Cinq à dix pour cent des décès attribués au syndrome (sans confirmation par l'autopsie) sont dus en fait à d'autres causes identifiables : méningites, autres infections foudroyantes, homicides et étranglements accidentels dans des berceaux inadaptés. Les fabricants ont modifié le dessin des berceaux; ainsi les morts par étranglement accidentel devraient maintenant disparaître. Différentes études ont montré que même les nouveau-nés arrivent à soulever des couvertures placées sur leur visage, de sorte qu'une suffocation due à la literie n'est pas une cause plausible de mort subite du nourrisson, contrairement à ce que pensent souvent les parents anxieux.

La mort subite du nourrisson paraît être plus fréquente quand la mère a reçu de la méthadone au cours d'un traitement pour toxicomanie à l'héroïne. Ces décès pourraient également être dus à un autre facteur de risque de mort subite, tel qu'une infection du liquide amniotique, mais il est possible que la méthadone elle-même y joue un rôle. Après une seule prise de méthadone, la mère hypoventile ses poumons pen-



8. LA PROLIFÉRATION DES FIBRES ASTROCYTAIRES est constatée chez la moitié environ des victimes du syndrome de mort subite. Les fibres apparaissent dans différentes parties du tronc cérébral, notamment au niveau de la formation réticulée latérale, un centre de contrôle de la respiration. Ceci constitue un autre argument



en faveur de l'hypoxémie prolongée chez beaucoup de nourrissons frappés du syndrome de mort subite. La photographie de gauche montre une coupe du tronc cérébral d'un de ces bébés; les nombreuses lignes fines et noires sont des fibres astrocytaires. Elles sont absentes sur la photographie de droite, qui représente une coupe de tronc cérébral normal.

dant 24 heures et les bébés nés de ces mères répondent plus faiblement aux stimulus qui normalement accroissent la ventilation.

Chez de jeunes animaux d'expérience, la stimulation du larynx et de la région voisine par divers liquides provoque un arrêt des battements du cœur et de la respiration. Il est donc possible qu'une régurgitation de liquide venant de l'estomac ou qu'une absorption de liquide dans le larynx soient responsables de quelques cas de mort subite du nourrisson. A l'heure actuelle, il est impossible d'étudier sans risque ce mécanisme chez l'homme, aussi cette cause possible de mort subite ne pourra probablement pas être prouvée avant longtemps.

Stephen Arnon et ses collaborateurs ont pu montrer qu'un petit nombre de victimes du syndrome étaient mortes d'une forme infectieuse du botulisme. La bactérie *Clostridium botulinum* se développe dans l'intestin des nourrissons et fabrique assez de toxines pour provoquer la mort subite. La source de cette infection est habituellement l'ingestion de spores bactériennes contenues dans le miel. La toxine agit en se fixant de façon irréversible sur les terminaisons nerveuses, empêchant ainsi la libération du neurotransmetteur acétylcholine. Au même moment, les muscles respiratoires sont paralysés.

Pour éviter le drame

L'impact de la mort subite du nourrisson sur les familles touchées et sur le corps social est bien plus important que ne le laisserait prévoir le nombre de cas. La plupart du temps, les parents sont profondément traumatisés : ils réagissent avec incrédulité ou colère. Encore très récemment, la plupart des morts subites restaient inexplicables; c'est pourquoi très souvent l'un des parents blâme l'autre ou bien la personne qui s'occupait de l'enfant au moment de la mort de celui-ci. La douleur des parents, à laquelle se joint un sentiment de culpabilité, dure quelquefois plusieurs années. Ces parents deviennent particulièrement anxieux vis à vis leurs autres enfants (ceux qui survivent et ceux qu'ils auront plus tard) et exagérément protecteurs. La police, les voisins et la famille soupçonnent quelquefois les parents de mauvais traitements ou de négligences dans ces cas de mort subite, ce qui peut aboutir à des contacts désagréables avec les autorités légales et à des relations pénibles avec la famille et les amis. La plupart de ces conséquences désastreuses devraient disparaître lorsque la cause de chaque mort subite sera connue.

Il y a bon espoir que les études sur la prévention de la mort subite du

nourrisson s'avèrent efficaces à long terme. Lorsque les troubles prénataux qui affectent le nourrisson et le prédisposent à la mort subite seront identifiés, il sera possible de prévenir la lésion et ainsi d'éviter la mort. On met au point maintenant des études dans des domaines de plus en plus étendus pour détecter les anomalies qui permettront d'identifier les nourrissons à haut risque de mort subite.

L'une des méthodes dont on peut attendre le plus est l'enregistrement de l'activité électrique des cellules nerveuses du tronc cérébral en réponse à des stimulations visuelles, auditives et tactiles; on évalue ainsi l'intégrité du tronc cérébral. James Orlowsky de la Clinique de Cleveland a récemment indiqué que ces enregistrements (montrant les réponses à des stimulations auditives) étaient anormaux chez dix enfants qui eurent des apnées menaçantes pour leur vie, alors que ces mêmes enregistrements étaient normaux chez des enfants qui eurent à subir une hypoxémie prolongée pour d'autres raisons. Si ces efforts, conjugués à d'autres recherches, permettent de repérer sans erreurs les enfants à haut risque de mort subite, il sera possible d'éviter quelques-unes de ces morts en utilisant des appareils de surveillance capables de signaler un arrêt cardiaque ou respiratoire. Les appareils de ce type, actuellement disponibles pour l'utilisation à domicile, ne sont pas encore très au point mais l'on peut s'attendre à de sensibles améliorations.

Plusieurs médicaments, qui stimulent les centres régulateurs de la respiration, pourraient être utilisés pour prévenir les apnées chez les enfants menacés. Malheureusement, ces médicaments sont trop toxiques pour être administrés à domicile; mais on peut toujours espérer que l'industrie pharmaceutique fabriquera des composés plus maniables et plus sélectifs. Quels que soient les moyens employés, l'enfant n'en aurait besoin que pendant quelques mois seulement puisque les apnées prolongées, qui semblent caractériser beaucoup d'enfants à haut risque, disparaissent en général entre huit mois et un an.

Même si l'on parvient à empêcher la mort subite des nourrissons, le problème ne sera peut-être que partiellement résolu dans la mesure où les survivants pourraient présenter des signes pathologiques, une lésion cérébrale par exemple. Cette crainte n'a pas de raison d'être si l'on prévient à temps les processus qui prédisposent le bébé à la mort subite. En revanche, si le bébé est réanimé après une apnée prolongée ou un arrêt cardiaque, le pronostic à long terme est moins certain. Certains des bébés qui ont survécu à un tel choc sont plus ou moins handicapés. Heureusement la grande majorité des survivants ne présente aucune séquelle. ■

VIENT DE PARAÎTRE :

HÉRÉDITÉ et MANIPULATIONS GÉNÉTIQUES

Qu'est-ce qu'un gène? Quelle est sa structure, sa fonction? Dans quelle mesure détermine-t-il notre comportement? Cet ouvrage relate l'histoire de la génétique, la découverte de son fonctionnement et montre les applications des « manipulations » génétiques.

Préface de François Gros,
Professeur au Collège
de France.
Directeur général de
l'Institut Pasteur.

**BIBLIOTHÈQUE
POUR LA
SCIENCE**

**Commencez sans délai
une collection qui fera date.**

8, rue Férou Paris 6^e
Tél. : 329-92-08

**Bon de commande
Encart page 89**

Un campement paléolithique en Belgique

L'analyse de fragments de pierres retrouvés dans les sables permet de reconstituer des activités humaines datant de 9 000 ans. L'une des méthodes d'analyse consiste à remonter les outils de silex sur le bloc dont ils furent détachés.

par Francis van Noten, Daniel Cahen et Lawrence Keeley

En Europe, il y a près de 9000 ans, le climat froid associé à la dernière glaciation avait cédé la place à des conditions météorologiques plus tempérées, à peu près comparables à celles que connaît aujourd'hui le Nord de l'Europe. La toundra avait été remplacée par un couvert forestier à dominance de pins et de bouleaux. Si la toundra avait été peuplée de mammouths, de rhinocéros laineux et de rennes, les forêts abritaient alors différentes espèces de cerfs, d'élans, de bovidés sauvages et de sangliers. Une nouvelle ère s'ouvrait pour les groupes de chasseurs-collecteurs qui s'étaient jusqu'à présent attaqués aux animaux de l'époque glaciaire. Ces populations mirent au point de nouvelles stratégies, mieux adaptées aux mœurs moins grégaires des animaux postglaciaires. C'est sur cette période peu connue de la préhistoire européenne que de nouvelles méthodes d'analyse commencent à nous procurer des informations.

Pendant cette période, les chasseurs-collecteurs de l'Europe du Nord-Ouest ont souvent installé leurs campements sur des sols sableux : c'est pourquoi nous en savons si peu sur leur mode de vie. En effet, ces sols généralement acides conservent mal les restes organiques. Il s'ensuit que, sur ces sites, les principaux témoins de l'activité humaine sont les artefacts en silex que les chasseurs-collecteurs ont fabriqués, utilisés et abandonnés dans leurs campements. Notre propos est de décrire l'un de ces campements découverts en Belgique et de montrer tous les renseignements que donnent les artefacts de silex sur leurs fabricants et utilisateurs d'il y a 9000 ans.

Le village de Meer est situé à proximité de la frontière de la Belgique et des Pays-Bas, à 35 kilomètres environ au Nord-Est d'Anvers. On exploitait, près du village, une sablière le long d'une ancienne dune d'origine

éolienne. Vers 1965 vinrent au jour les vestiges d'une occupation préhistorique, à environ 50 centimètres de profondeur. Des archéologues amateurs et ensuite l'un de nous (Francis van Noten) identifièrent successivement quatre sites dans le même massif dunaire. Le dernier de ces sites est encore l'objet de fouilles. Tous quatre sont des campements établis sur ce qui était alors une petite dune dominant des vallées peu profondes ; elles étaient alors vraisemblablement marécageuses mais sont aujourd'hui drainées et cultivées. Ceci mis à part, l'environnement de ces campements, aux temps préhistoriques, ne devait pas être très différent de ce qu'il est aujourd'hui.

Le second de ces sites, Meer II, objet de notre exposé, a été fouillé systématiquement de 1967 à 1969 par l'un de nous (F. van Noten). L'analyse des découvertes suscita des hypothèses si fascinantes qu'elles demandaient vérification : les fouilles furent donc reprises en 1975-1976.

L'inventaire des trouvailles

En dehors du matériel lithique (outillage en pierre), les différentes fouilles de Meer II n'ont livré que quelques fragments d'os non identifiables, quelques concentrations de menus fragments de charbon de bois, correspondant sans doute à des foyers, et quelques fragments d'ocre (de l'hématite, oxyde de fer de couleur rouge). En revanche, les artefacts lithiques étaient extrêmement abondants. Ils comprenaient des percuteurs en quartzite et en schiste, et de petites meules en grès. D'autres fragments de grès semblent provenir de l'éclatement de pierres de foyer, mais 98 pour cent environ des 16 000 artefacts lithiques découverts pendant les fouilles étaient en silex.

L'origine de ces matériaux pose un

problème. Le grès quartzite à grain fin qui a servi à fabriquer quelques outils vient certainement d'un village (Wommersom) situé à 75 kilomètres au Sud-Sud-Est de Meer. La question épineuse est en fait posée par le silex lui-même : il n'y en a pas dans la région ! Toutefois, si l'on se souvient qu'il y a 9000 ans, quand les sites étaient peuplés, le niveau de la mer se trouvait plusieurs mètres plus bas qu'aujourd'hui, on conçoit facilement que des graviers contenant du silex en abondance aient pu être exposés à ciel ouvert dans les vallées des cours d'eau. Ainsi était-il sans doute possible de récolter des galets de silex pendant la période postglaciaire. Le fait que bon nombre des artefacts recueillis à Meer II aient été réalisés à partir de galets de silex roulés par l'eau semble confirmer cette hypothèse.

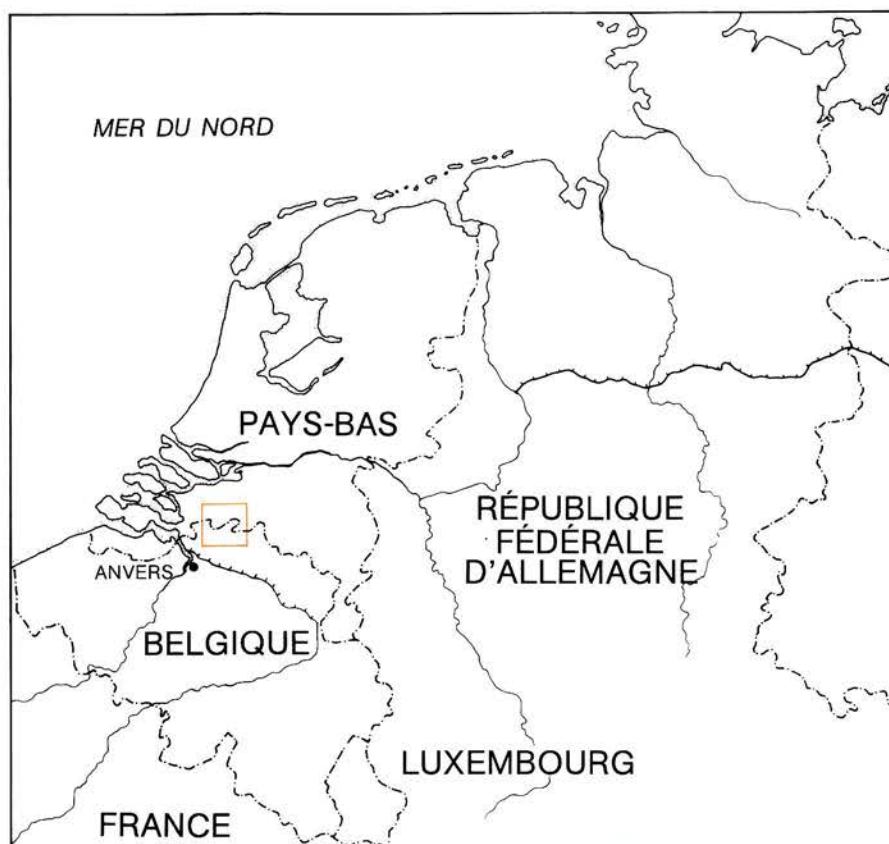
L'industrie lithique de Meer II n'est pas répartie uniformément sur un seul niveau. Plus de la moitié des outils étaient concentrés dans une couche d'à peu près neuf centimètres d'épaisseur, mais la distance entre les artefacts les plus profondément enfouis et les plus proches de la surface était cinq fois supérieure. Or, il est de règle en archéologie comme en géologie qu'un niveau plus profond soit antérieur à un niveau supérieur. Cette large répartition verticale des artefacts pose donc d'entrée de jeu une question capitale : les trouvailles représentent-elles un ensemble accumulé lors d'une seule occupation du site puis dispersé verticalement par des processus naturels comme les galeries des animaux fouisseurs ou la croissance des racines ? Ou bien cette répartition des outils correspond-elle, conformément à la théorie, à plusieurs phases d'occupation ? Les seules données de terrain ne permettent pas de répondre à cette question. C'est ici qu'intervient une nouvelle méthode d'analyse : le remontage.

Avant d'exposer cette technique et les conclusions qu'on peut tirer de son application à Meer II, il nous faut décrire brièvement les types d'artefacts découverts sur le site. A part l'énorme quantité de déchets de fabrication d'outils en silex (plus de 80 pour cent de l'ensemble du matériel), les artefacts les plus nombreux sont des outils du type burin. Il y en a 264, soit plus de 1,5 pour cent du total. Viennent ensuite les grattoirs (170 unités) et les pointes de projectiles (87 unités). La majorité des pointes appartiennent au type des « pointes tjongériennes »; ce nom vient d'un site appartenant au groupe des *Federmesser*, un ensemble de sites glaciaires tardifs découverts en Europe du Nord-Ouest. On trouve également 81 pièces encochées, 63 pièces tronquées, 59 microlithes et 45 lames à bord abattu, dont plusieurs sont à l'état de fragments. Les pièces restantes consistent essentiellement en perçoirs fins ou grossiers et en quelques outils composites susceptibles de plusieurs utilisations. Un bon nombre de pièces retouchées atypiques (231 en tout) n'ont pu être réparties dans aucune des catégories précédentes.

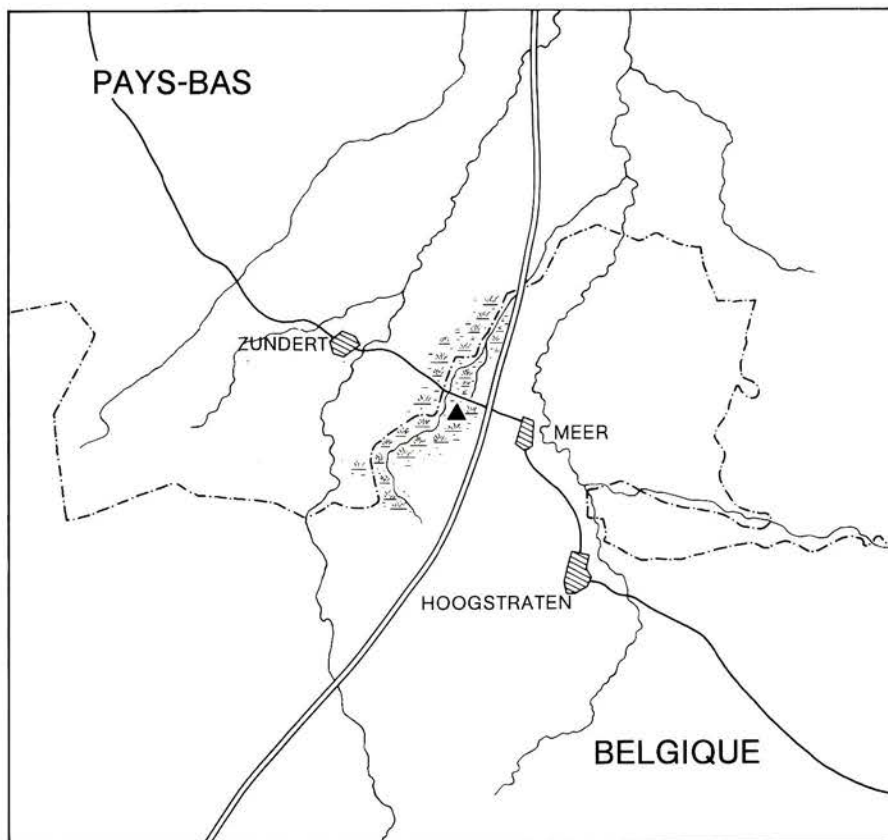
Même si l'inventaire de Meer II comprend des pointes tjongériennes et d'autres outils qui peuvent être rapprochés des industries lithiques du groupe des *Federmesser*, l'outillage pris dans son ensemble n'appartient pas au type glaciaire tardif classique. En outre, les datations au carbone 14 des échantillons de charbon de bois récoltés à Meer I et Meer II permettent de donner à l'occupation du site un âge compris entre 8740 et 8950 ans, c'est-à-dire entre les périodes postglaciaires Pré-Boréale et Boréale. Une telle date est relativement basse pour une industrie lithique apparentée à celles des *Federmesser*, car la plupart se situent entre il y a 10 000 et 11 000 ans. Il y a néanmoins des exceptions à cette chronologie et, compte tenu du fait que l'industrie lithique de Meer n'est en rien classique, assigner au site un âge de 9000 ans n'apparaîtra ni inattendu ni problématique.

Un diagramme du nombre des artefacts de Meer II par mètre carré révèle d'importantes variations. Les carrés les plus riches contiennent jusqu'à 500 artefacts, tandis que les plus pauvres n'en contiennent presque pas, voire aucun. Quatre concentrations distinctes d'artefacts apparaissent nettement. Elles diffèrent tant par leur étendue que par la densité des trouvailles.

La Concentration A, à la bordure Nord-Ouest du site, forme une ellipse allongée, de sept mètres de long sur 3,5 à 4 mètres de large. Elle comporte de nombreux outils de tous types, représentant à peu près un tiers du total de l'outillage retrouvé sur le site. Juste à l'Est de celle-ci, dans une aire satellite (A-1) on



1. LES CAMPEMENTS DE MEER sont situés à proximité de la frontière entre la Belgique et les Pays-Bas, à environ 35 kilomètres au Nord-Est d'Anvers. La région comprise dans le cartouche en couleur est agrandie sur la figure ci-dessous.

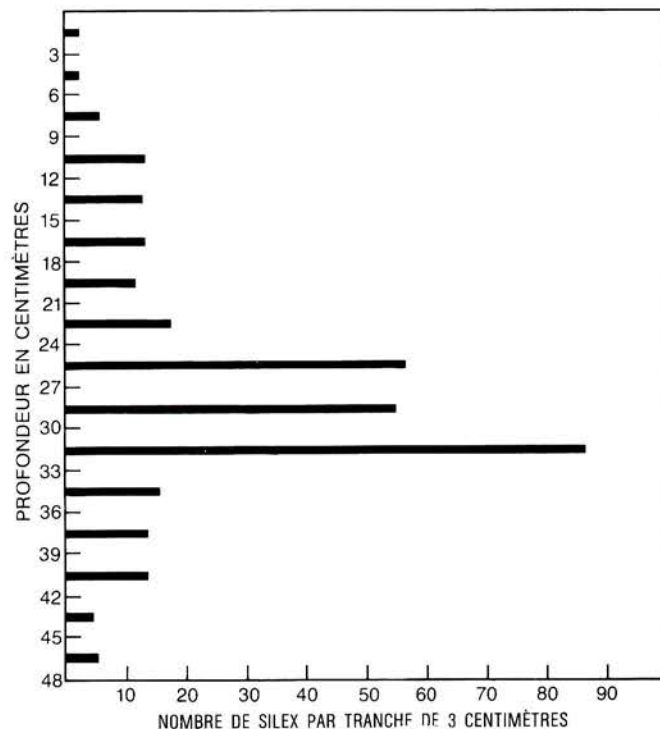
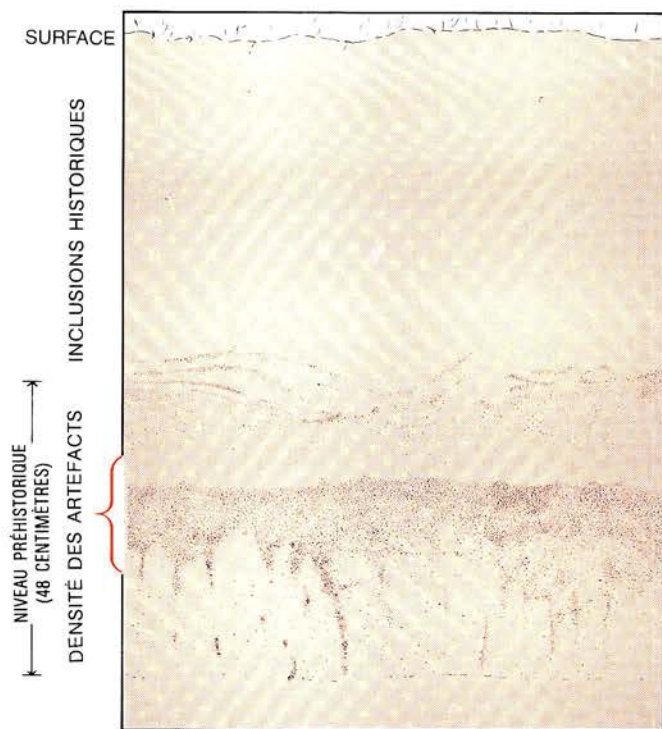


2. EN BORDURE D'UNE ANCIENNE DUNE (triangle noir) recouverte aujourd'hui d'une forêt mixte, l'exploitation commerciale du sable mit au jour, vers 1965, des traces d'activités humaines préhistoriques. Les chercheurs localisèrent quatre sites sur le même massif dunaire. Le travail des auteurs concerne Meer II, le second de ces sites.

trouva de petits fragments de silex identifiables comme des chutes de burin, c'est-à-dire des déchets de la fabrication ou du réaffutage des burins. La présence de ces chutes donne à penser que le travail a été

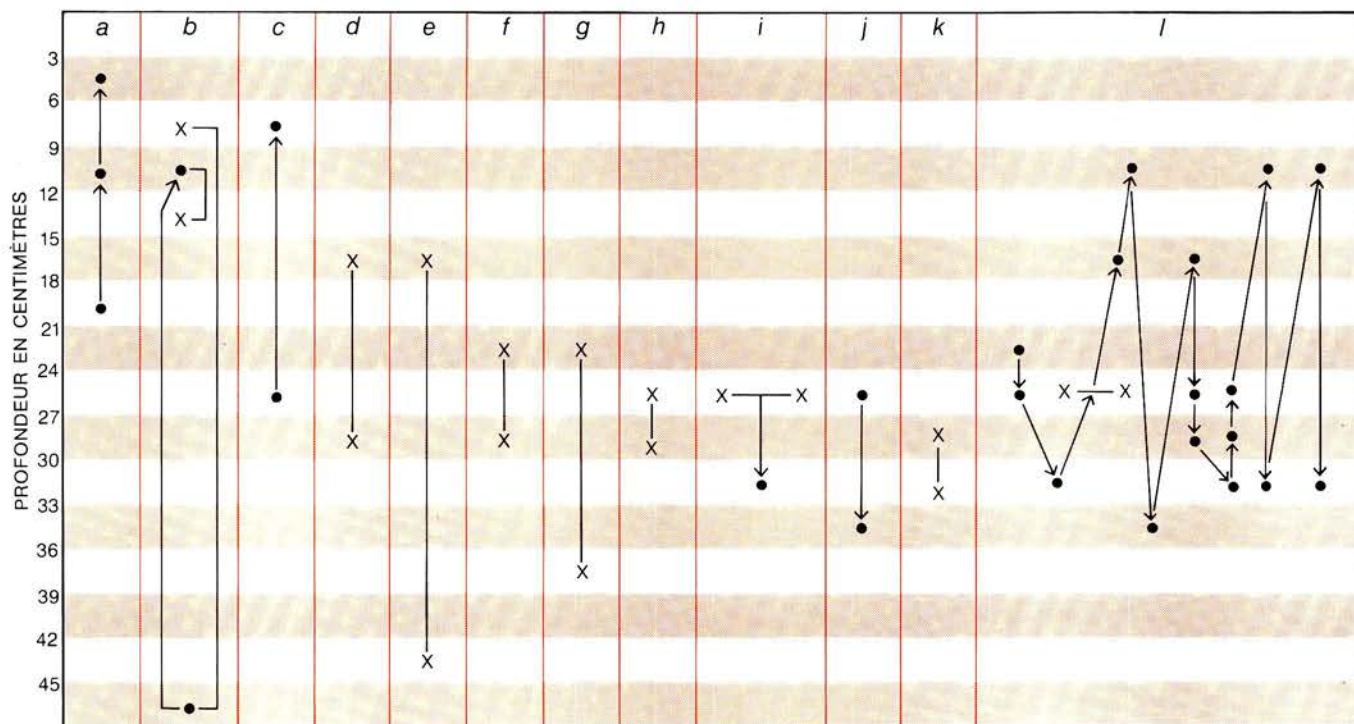
effectué dans cette zone. A la limite Nord-Ouest de la concentration principale, une seconde aire satellite (A-2) a donné un grand nombre de grattoirs, suggérant une autre activité spécialisée à cet endroit.

Enfin, à la limite Ouest de la concentration, se trouvent cinq pointes tjongériennes groupées comme si un carquois de flèches avait été déposé là. Outre l'outillage de silex et les déchets de taille, la



3. LES VESTIGES PRÉHISTORIQUES DE MEER II sont presque uniquement des outils de silex distribués verticalement dans une couche de terrain d'une cinquantaine de centimètres (à gauche en coupe). Le diagramme de droite indique la répartition du nombre d'artefacts

exhumés par tranche artificielle de trois centimètres. Plus de la moitié d'entre eux étaient concentrés dans une zone de neuf centimètres, les autres se trouvaient plus haut ou plus bas : ce phénomène amena d'abord à douter de l'unité de l'occupation du site.



4. L'UNITÉ DE L'OCCUPATION DE MEER II fut démontrée par l'analyse des remontages. Le graphique montre les distances verticales considérables qui séparaient parfois les artefacts ainsi raccordés. Les flèches joignant deux points noirs indiquent des raccords entre éclats détachés l'un après l'autre du même nucléus. Les lignes reliant des croix

indiquent des raccords entre les fragments d'un support ou d'un outil cassé. Chaque bande horizontale représente trois centimètres de niveau de fouille. Il est évident que le sol ancien a été perturbé par des processus naturels : la croissance des racines, par exemple, qui ont séparé les artefacts les uns des autres.

Concentration *A* comporte trois foyers et quelques fragments d'os non identifiables, de sorte qu'on ignore s'il s'agit de restes de repas, de déchets du travail de l'os, voire de restes funéraires.

La Concentration *B*, à l'extrémité Sud-Ouest du site, a une forme moins bien définie que la précédente. Son diamètre peut être estimé à 2,5 ou 3 mètres. Elle ne contient pas de foyer, mais des quantités relativement importantes d'ocre, de déchets de taille du silex, de fragments de silex éclatés au feu, et quelques lames et pointes de silex.

La Concentration *C*, assez petite et à peu près circulaire, a un diamètre de 1,5 mètre environ. Elle est proche du centre du site. On y trouve trois « nucléus » (c'est-à-dire le bloc qui reste quand on a détaché du rognon ou du galet les lames ou éclats qui serviront à la fabrication des outils). Un grand nombre d'éclats y furent découverts, mais aucun autre artefact. Il s'agit sans doute d'une aire de taille où avait lieu le premier stade de la fabrication des outils.

La Concentration *D*, plus petite que la Concentration *A*, mais relativement semblable par la forme et l'orientation, se trouve à la bordure Est du site. Elle se caractérise par un grand nombre de très petits éclats qui résultent évidemment de la fabrication et du réaffûtage d'outils. Quant à ces derniers, ils sont représentés par des burins, des perçoirs et des pièces à encoches, mais il n'y a que quelques grattoirs.

Deux nouvelles méthodes d'analyse

Telle est l'image de Meer II que permettent d'évoquer les méthodes archéologiques conventionnelles. Celle-ci laisse bon nombre de questions sans réponse. Quelles interprétations supplémentaires peut-on imaginer qui puissent transformer ce portrait statique en portrait dynamique? Commençons par les questions restées sans réponse.

Nous avons vu que, malgré la cohérence des datations au carbone 14, les artefacts du site sont séparés par des distances verticales qui vont jusqu'à 45 centimètres. D'autre part, l'analyse de la distribution horizontale des artefacts montre l'existence de quatre concentrations, contenant chacune un assemblage d'artefacts différent. Ces concentrations résultent-elles d'une seule phase d'occupation du massif dunaire, ou bien sont-elles le produit d'occupations successives sans rapport les unes avec les autres? Le problème est crucial et, à ce stade de la recherche, il nous est impossible de trancher en faveur de l'une ou de

l'autre hypothèse. De plus, les vestiges organiques retrouvés à Meer II sont si pauvres et si détériorés que leur analyse ne peut fournir aucun appoint à l'interprétation. Pour répondre à nos questions, nous ne disposons que de l'industrie lithique.

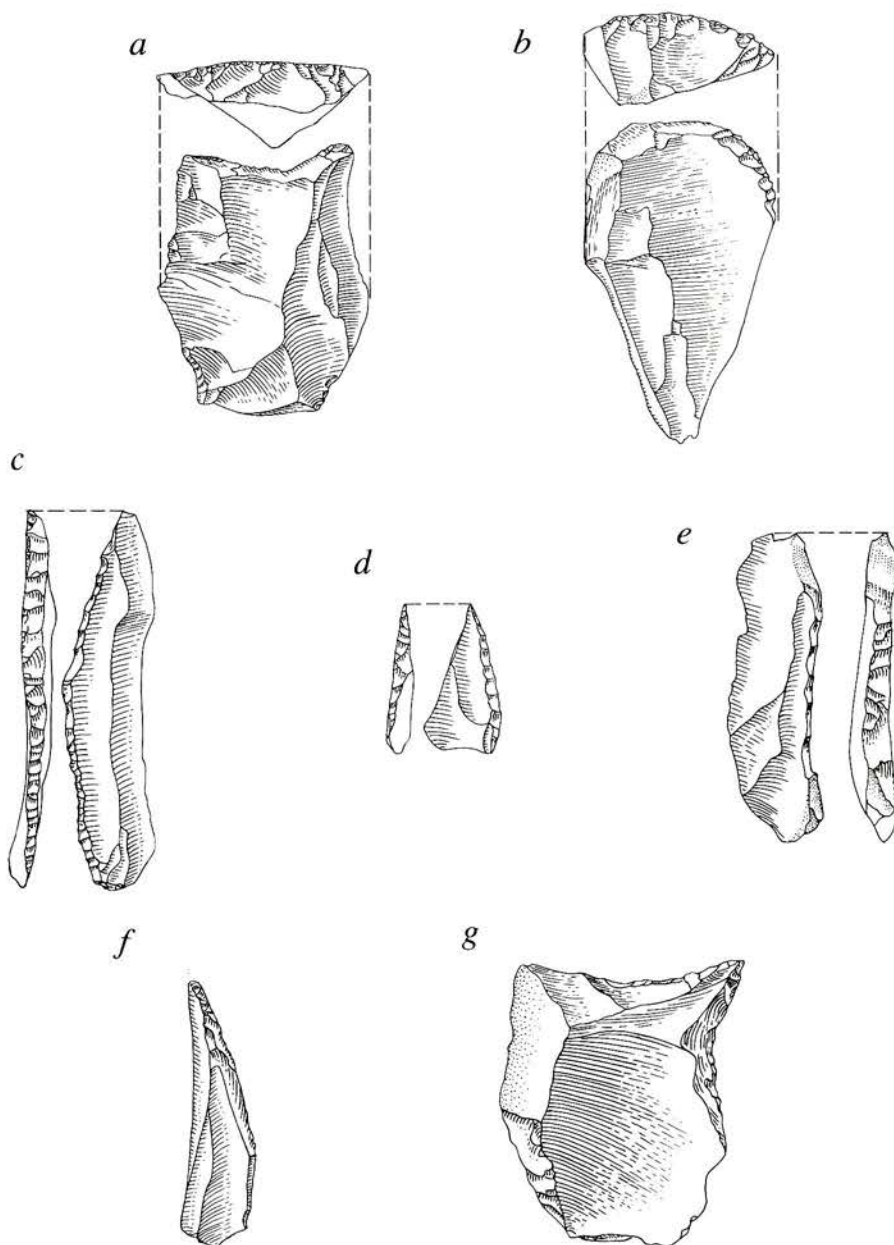
Il nous a donc fallu utiliser et affiner deux nouvelles méthodes d'investigation : le remontage et l'analyse des traces microscopiques d'utilisation.

L'un de nous (Daniel Cahen) mena l'étude du remontage; ce travail consiste avant tout à résoudre une série de puzzles de pierre en trois dimensions. Le chercheur peut partir d'un nucléus abandonné et se mettre en quête des « supports » qui

en ont été détachés successivement, pour être rejetés ou transformés en outils de divers types. Il peut également partir d'un outil et rechercher les divers fragments de silex qui en ont été enlevés au cours du processus même de fabrication, ou lors de l'avivage de l'outil émoussé par l'usage. Il peut enfin rassembler les différentes parties d'un outil unique mais brisé en deux ou plusieurs fragments.

La technique du remontage

Le remontage exige beaucoup de temps et de travail. Toutefois, lorsque le programme de remontage



5. LESTYPES D'OUTILS retrouvés à Meer II sont présentés ici dans l'ordre de leur fréquence relative. Les plus communs sont les burins (*a*) : il y en avait 264 en tout. Immédiatement après viennent les grattoirs (*b*) au nombre de 170, suivis par les pointes de projectiles. Ces dernières se présentent sous deux formes : pointes tjongeriennes (*c*) et microlithes (*d*). Bien qu'on ait encore retrouvé d'autres types d'outils, ceux-ci et les trois suivants : lames à bord abattu (*e*), petits perçoirs (*f*) et becs destinés au gros travail (*g*) forment la plus grande partie de l'inventaire.

CHOISISSEZ DE RECEVOIR

POUR LA

SCIENCE

CHAQUE MOIS A VOTRE DOMICILE

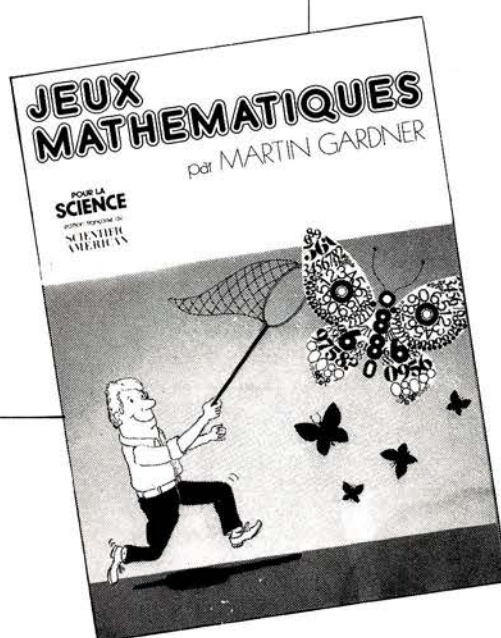
Bénéficiez du tarif préférentiel*
et recevez en cadeau de bienvenue

Le livre
"JEUX MATHÉMATIQUES"
de Martin Gardner

Recueil des rubriques mensuelles parues dans
POUR LA SCIENCE.

* Le tarif préférentiel vous permet de réaliser une économie
de 5,50 F par numéro sur un abonnement de trois ans.

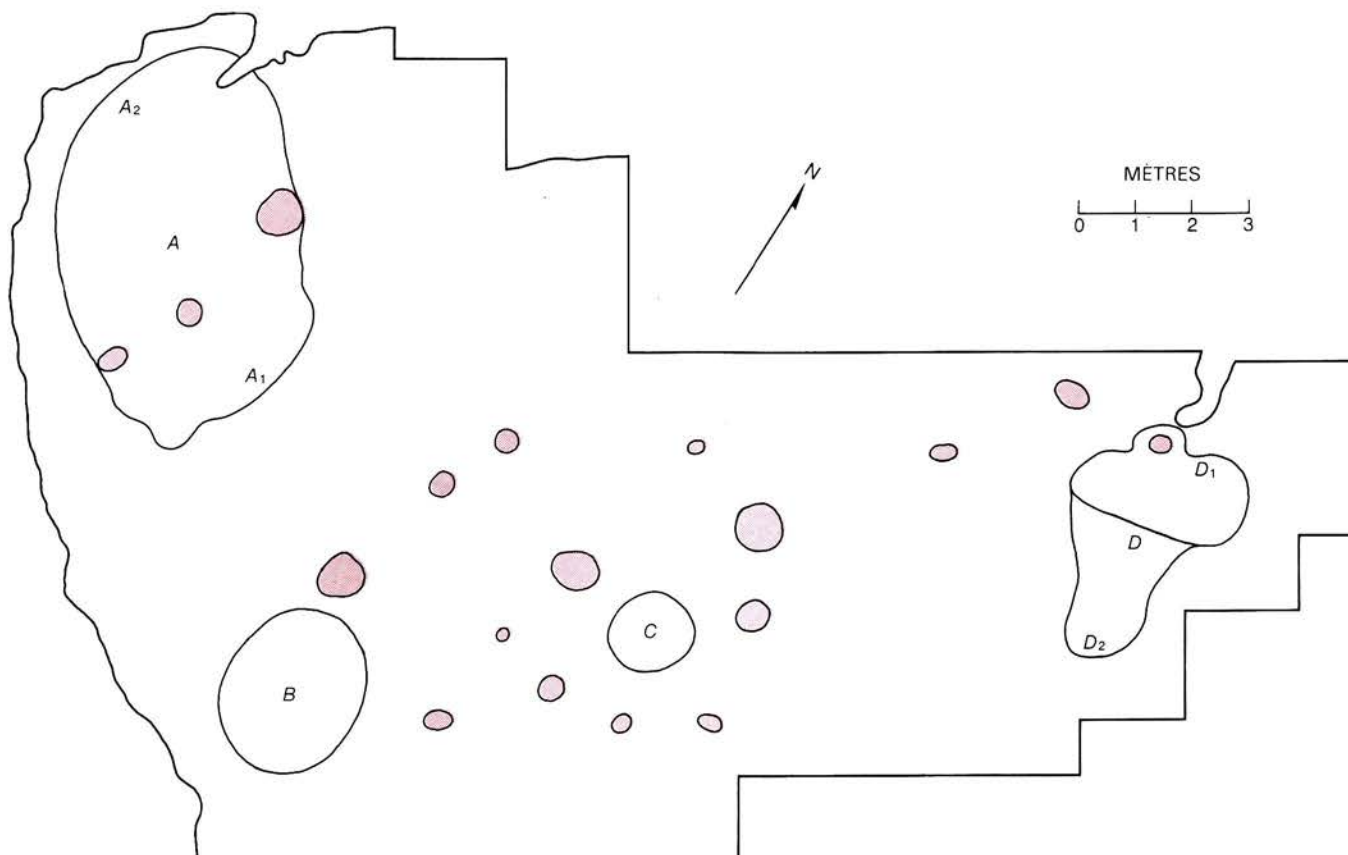
voir encart page 39



Deux cas sont particulièrement significatifs à cet égard. Dans le premier, un éclat de silex trouvé à 45 centimètres de profondeur se raccorde à un autre éclat trouvé à une profondeur de 12 centimètres. Un fragment raccordable au second éclat gît quelques centimètres plus bas dans la même tranchée, et un

L'étude du remontage élimine donc la possibilité de voir dans la distribution verticale des artefacts le résultat d'événements survenus au cours d'une longue période. Qu'en est-il de la distribution horizontale? La description des résultats du remontage d'un groupe d'outils et de déchets de taille, provenant tous d'un unique galet de silex, va nous fournir la réponse. Ce galet qui présente des zonation claires est surnommé « bloc-à-la-ligne-blanche ». Malgré l'absence du nucléus résiduel et de quelques éclats corticaux, tout le

L'ensemble des artefacts provenant du « bloc-à-la-ligne-blanche » représente à l'évidence un assemblage d'outils fabriqués dans une même série d'opérations qui commence dans la Concentration *D* pour s'achever dans l'aire satellite *A-1*. La distribution horizontale des éléments de ce bloc prouve la liaison existant entre les deux aires de travail et par conséquent leur contemporanéité. Le remontage a permis de reconstituer plusieurs assemblages de ce genre.



extrémités de la zone fouillée et deux concentrations plus petites, B et C, au Sud de l'axe principal. La plus grande concentration, A, comportait deux aires satellites, A-1 à sa limite Sud-Est et A-2 à sa limite Nord-Ouest. Elle comprenait en outre trois foyers (*en couleur*). D'autres traces de feu (*en couleur*) furent découvertes ailleurs.

provenant pour la plupart de la Concentration D.

Les conclusions du travail de remontage dans les quatre concentrations peuvent se résumer de la manière suivante.

Concentration D. Sur un total de 1464 artefacts, on en a remonté à peu près un tiers. Ce pourcentage dépasse de loin celui des trois autres concentrations, où moins d'un cinquième des artefacts en moyenne a été remonté. Le succès obtenu en D doit être attribué principalement au caractère spécifique des activités qui se sont déroulées dans cette concentration où beaucoup d'outils furent fabriqués, puis utilisés et abandonnés sur place.

Sur les 104 outils trouvés en D qui présentent des traces de modification ou d'avivage, 93 ont été remontés. Dans nombre de cas, il s'agit seulement de petits éclats de retouche qui ont été replacés sur l'outil. Dans d'autres cas, les outils eux-mêmes

ont été raccordés entre eux et parfois remontés sur le nucléus dont on les avait détachés. Dans la majorité des cas, il s'avère que les outils avaient été fabriqués dans la Concentration D et aussi que les supports sur lesquels ils avaient été réalisés furent détachés de leur nucléus au même endroit.

Ce trait qui pourrait sembler de peu d'importance exclut de manière définitive l'idée que la Concentration D ne soit qu'un dépotoir d'outils au rebut, de supports inutilisés et de déchets de taille. On s'expliquerait difficilement comment les outils, leurs déchets de fabrication et jusqu'au plus petit éclat de retouche ou de réavivage furent trouvés ensemble, si la Concentration D n'avait été une aire de travail où les outils ont été fabriqués et utilisés.

Concentration A. Cette grande aire et son aire satellite A-1 semblent avoir eu des relations prédominantes avec la Concentration D. Cer-

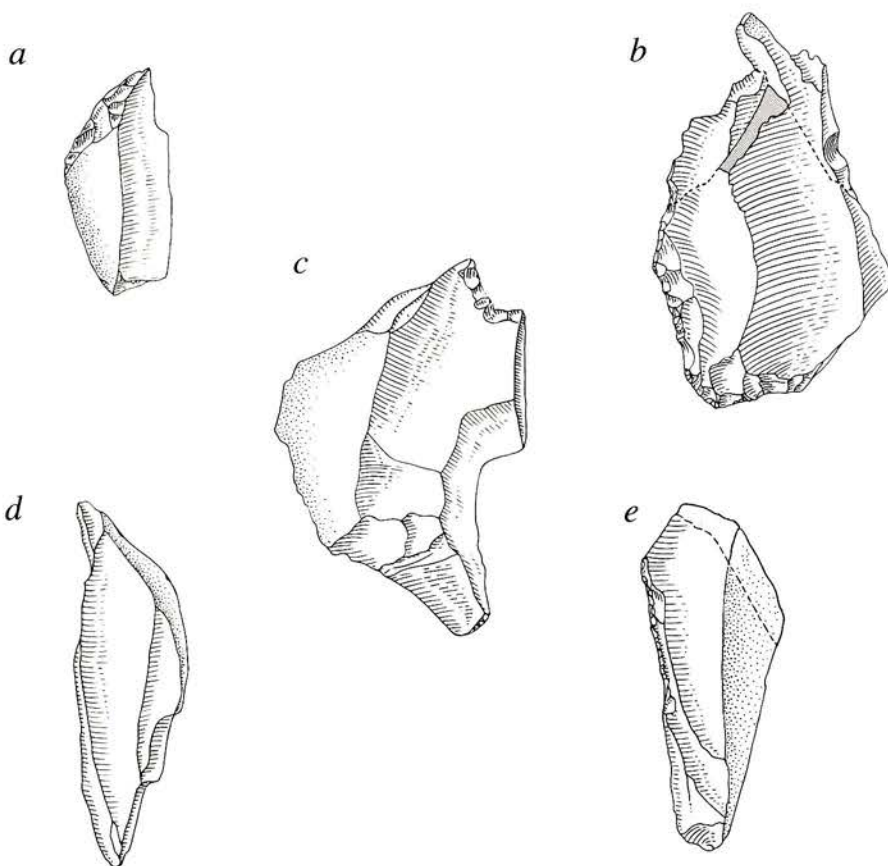
tains outils et supports préparés dans la Concentration D, y compris des artefacts du bloc-à-la-ligne-blanche furent transportés en A-1. De nombreuses liaisons entre les deux concentrations et la similitude des activités qui s'y déroulèrent impliquent que les mêmes artisans travaillèrent dans les deux endroits.

Un autre aspect de l'étude de la Concentration A combine le remontage et la typologie archéologique traditionnelle. L'inventaire des outils trouvés en A comprend entre autres des pointes tjongériennes, des microolithes et des lames à bord abattu; ces deux derniers types pouvant aussi être classés comme pointes de projectiles, différentes des pointes tjongériennes. La plupart des remontages effectués dans cette concentration consistent en raccord d'éclats d'avivage avec des outils réaffutés. Peu d'outils ont été raccordés entre eux et peu de groupes d'outils ont été remontés sur des nucléus. En outre, bien que la plupart des pointes soient cassées, une recherche intensive des parties manquantes n'a donné aucun résultat, alors même que les raccords entre les fragments d'un même outil sont des plus faciles à repérer.

Le remontage indique pourtant que les pointes furent manufacturées dans la Concentration A. Ceci nous amène à conclure que l'une des activités exercées à cet endroit consistait à remonter des pointes sur des hampes de projectiles dont les pointes précédentes avaient été endommagées. Quant aux fragments manquants et introuvables, ils doivent avoir été perdus sur les lieux où, pendant la chasse, les pointes furent brisées.

Concentration C. La structure de cette concentration est plus complexe et plus difficile à interpréter que celle de la Concentration D. Quelques liaisons avec d'autres concentrations sont évidentes. On y a retrouvé par exemple un nucléus épuisé et des outils usés qui avaient été utilisés dans la Concentration D. D'autre part, des nucléus épuisés par la fabrication de supports dans la Concentration C furent trouvés dans la Concentration A et son aire satellite A-1. Si l'on suppose que la Concentration C formait une aire d'activité spécialisée, le travail qui y fut effectué consistait sans doute en la fabrication de supports destinés à être transformés ailleurs en outils; l'étude du remontage donne à penser que c'était en dehors de la zone fouillée à Meer II.

Concentration B. Cette concentration, qui n'a quasiment aucun lien avec les trois autres, présente une structure beaucoup plus « claire » que celle de la Concentration C. Les travaux de remontage ne donnent que trois exemples de relations. Un burin utilisé d'abord dans la Concentration A, où un fragment en fut détaché, fut utilisé plus tard à proximité de la



7. LES CINQ OUTILS CI-DESSUS appartiennent au « bloc-à-la-ligne-blanche »; on reconnaît quatre d'entre eux sur la photographie de la figure 8. L'outil *a* est un burin trouvé dans la Concentration D; on le voit à l'extrême droite de la photographie, portant le numéro d'enregistrement XXIII 672. L'outil *b* est un burin qui servit à creuser des rainures fines dans l'os; il provient de l'aire A-1 (sur la photographie il est au bord droit du groupe de gauche, marqué XXV 233). Il comporte deux éclats remontés: celui du centre fut découvert dans la Concentration D et celui de gauche dans l'aire A-1. Tout ceci montre que le burin a été fabriqué et utilisé dans la Concentration D puis transporté dans l'aire A-1 où il fut à nouveau utilisé et réaffuté, et enfin abandonné. L'outil *c* est un perceur servant à un travail léger sur de l'os, il provient de l'aire A-1. Sur la photographie il est proche du centre du groupe de droite et porte le numéro XXV 173. L'outil *d*, trouvé dans la Concentration D, est un autre perceur qui effectua un travail léger sur de l'os; il est en partie visible sur la photographie, en bas à gauche du groupe de droite (N° XXIII 669). L'outil *e* n'est pas visible sur la figure 8; trouvé dans l'aire A-1, il a été utilisé pour un travail délicat sur de l'os. L'éclat qui lui est raccordé (*en haut*) fut également retrouvé dans l'aire A-1.

Concentration C où l'on en trouve un fragment supplémentaire. Quant au burin usé, on le retrouve dans la Concentration B. Une autre liaison concerne un fragment d'un éclat de silex brûlé retrouvé en D, auquel se raccorde un fragment similaire provenant de B. Enfin, un autre éclat de silex de la Concentration B se raccorde avec un éclat trouvé en A. En revanche, on trouve en B les restes du débitage de quelques galets de silex de très mauvaise qualité. Du fait que la Concentration B est localisée à une certaine distance de l'axe principal de Meer II et ne contient pas de foyer mais une grande quantité de silex brûlé, on peut conclure qu'il s'agit d'un dépotoir associé non aux autres concentrations de Meer II, mais à des zones situées plus à l'Ouest, aujourd'hui détruites par l'exploitation de la sablière.

L'analyse des résultats du remontage montre les dangers d'un inventaire typologique des artefacts mené selon des listes-types : il peut donner une image statique d'un site et des activités qui s'y sont déroulées. Le remontage permet d'établir que bien des outils de Meer II furent fabriqués en un point pour être utilisés et réaffûtés ailleurs, et qu'ils pouvaient éventuellement aboutir en un troisième endroit. Le remontage montre aussi qu'un outil de silex peut évoluer au cours de son utilisation d'un type à un autre. Ainsi, seule l'étude dynamique d'une industrie lithique peut conduire à une interprétation précise des activités exercées sur un site.

L'analyse des résultats du remontage montre les dangers d'un inventaire typologique des artefacts mené selon des listes-types : il peut donner une image statique d'un site et des activités qui s'y sont déroulées. Le remontage permet d'établir que bien des outils de Meer II furent fabriqués en un point pour être utilisés et réaffûtés ailleurs, et qu'ils pouvaient éventuellement aboutir en un troisième endroit. Le remontage montre aussi qu'un outil de silex peut évoluer au cours de son utilisation d'un type à un autre. Ainsi, seule l'étude dynamique d'une industrie lithique peut conduire à une interprétation précise des activités exercées sur un site.



8. LA TECHNIQUE DU REMONTAGE a permis de reconstituer la plus grande partie d'un galet de silex qu'un groupe de chasseurs avait débité pour en faire des outils, au début de la période qui suivit la glaciation au Nord-Ouest de l'Europe. Le « nucléus » central et plusieurs éclats n'ont pas été retrouvés. On aperçoit ici des éclats

constituant des déchets de taille et quatre des neuf outils (représentés sur la figure 7) tirés de ce galet. Ces perceurs, graveurs et burins servirent à la fabrication d'objets en os, sur le site belge de Meer II. Comme le galet présentait une zonation claire, le groupe fut surnommé « bloc-à-la-ligne blanche ».

L'analyse des traces microscopiques d'utilisation

L'analyse des traces microscopiques d'utilisation apporta une contribution décisive à nos interprétations.

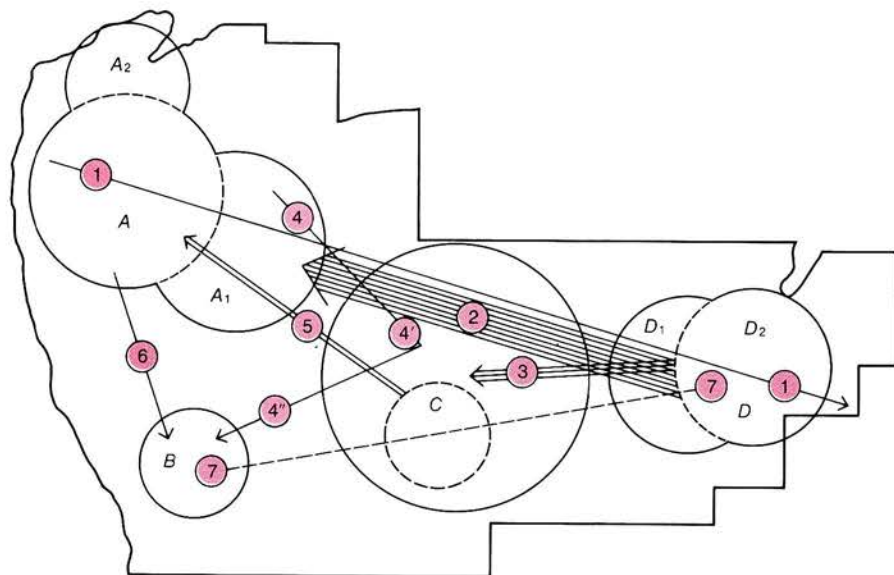
Cette nouvelle méthode d'analyse consiste à examiner à fort agrandissement les bords de travail et les pointes des outils en silex. Des tests en laboratoire ont en effet démontré que des pols caractéristiques diffé-

renciés apparaissent sur les outils de silex lorsqu'ils sont utilisés pour travailler des matériaux différents : l'os, le bois, le cuir ou la corne de cervidé (voir *Les fonctions des outils en silex au Paléolithique*, par Lawrence Keeley, *Pour la Science* n° 3, janvier 1978).

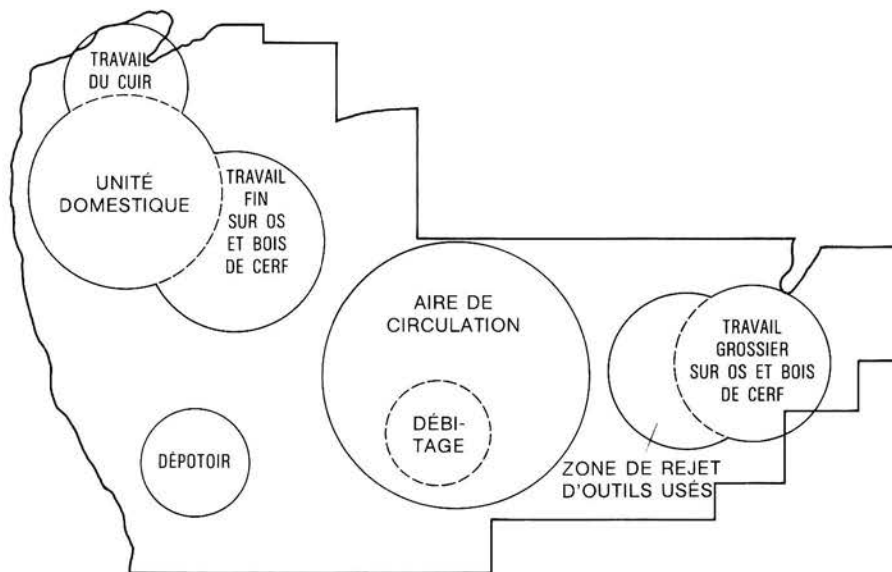
Le remontage particulièrement remarquable du bloc-à-la-ligne-blanche, trouvé dans la Concentration D, constitue un exemple des résultats obtenus par l'étude des traces d'utilisation. L'un de nous (Lawrence Keeley) découvrit que sur les dix outils et fragments d'outils appartenant à ce bloc, neuf avaient été utilisés pour graver ou percer de l'os. Unique exception : un grattoir utilisé pour racleur de l'os. Les outils de ce bloc furent utilisés dans la Concentration D pour de gros travaux, tels que le dégrossissement d'outils en os devant servir à un travail plus fin. L'un des perçoirs, par exemple, avait été utilisé pour forer des trous allant jusqu'à dix millimètres de longueur et de profondeur, tandis que l'un des burins avait servi à graver des rainures de quelque cinq millimètres de largeur et de profondeur. Le grattoir lui aussi avait été soumis à un traitement vigoureux. En revanche, la plupart des outils du même bloc qui avaient été transportés de la Concentration D vers la Concentration A furent utilisés à des travaux plus délicats. Trois burins avaient creusé des rainures n'excédant pas deux millimètres de profondeur et l'unique perçoir avait foré des trous de dimensions similaires, suggérant ainsi que ces outils furent utilisés à un travail de finition ou de décoration d'objets en os.

Comme nous l'avons vu, d'autres outils provenant de la Concentration D ont pu être remontés. Ce sont pour la plupart des burins et des perçoirs. L'analyse des traces d'utilisation montre qu'ils furent utilisés à peu près exclusivement au travail de l'os ou du bois de cervidé. Il y avait notamment trois perçoirs à os que l'on avait utilisés en tournant dans le sens contraire à celui des aiguilles d'une montre. Or, presque tous les autres perçoirs de Meer II avaient tourné dans le sens des aiguilles d'une montre. Nous pouvons en déduire que plusieurs artisans devaient travailler dans la Concentration D, et que l'un d'eux était probablement gaucher.

Des 29 grattoirs en bout de lame retrouvés dans l'aire satellite A-2, plus de la moitié ont été remontés. Neuf de ces grattoirs avaient été fabriqués sur des supports provenant d'un nucléus unique. L'analyse des traces d'utilisation montre que les 29 outils servirent à gratter du cuir. Ce secteur de la Concentration A peut donc être identifié sans aucun doute comme une aire servant principalement, si ce n'est exclusivement, à la



9. LE REMONTAGE fait la preuve de la connexion des quatre concentrations d'artefacts retrouvées à Meer II. Le schéma ci-dessus illustre sept exemples de liaisons (numéros en couleur). (1) Un nucléus débité dans la Concentration A a été transporté à la périphérie de la Concentration D et abandonné là (sur le schéma, de l'extrême gauche à l'extrême droite). (2) Huit artefacts (un nucléus, trois supports et quatre outils) furent transportés de la Concentration D vers la Concentration A. (3) Quatre artefacts (un nucléus et trois outils de rebut) qui avaient été utilisés dans la Concentration D furent abandonnés à proximité de la Concentration D. Ils pourraient avoir été jetés là par un individu travaillant dans la Concentration D. (4) Un outil s'est déplacé en deux temps, indiqués par la flèche coudée. Un éclat provenant de cet outil fut retrouvé dans l'aire satellite A-1. Un fragment assignable à un stade intermédiaire de sa fabrication fut découvert à la périphérie de la Concentration C. L'outil se trouvait sous sa forme finale dans la Concentration B. (5) Deux nucléus utilisés à la confection de supports dans la Concentration C furent transportés dans la Concentration A. (6) Un support détaché d'un nucléus dans la Concentration A fut trouvé dans la Concentration B. (7) Des fragments d'un même artefact furent trouvés dans les Concentrations B et D.



10. L'ETUDE DES TRACES MICROSCOPiques D'UTILISATION sur les outils de Meer II permet d'assigner différentes activités à différents lieux. Ainsi, le poli d'usure présenté par certains outils de la Concentration D atteste qu'on y effectua un travail de dégrossissement sur de l'os ou du bois de cerf. Les pols de quelques burins et perçoirs de l'aire satellite A-1 indiquent un travail de finition sur les mêmes matériaux. Les pols des 29 grattoirs découverts dans l'aire satellite A-2 montrent que tous furent utilisés pour gratter du cuir. Les traces portées par d'autres outils de la Concentration A montrent que ceux-ci servirent à travailler le bois, à couper des végétaux non ligneux et de la viande.

préparation du cuir. L'analyse des traces d'utilisation relevées sur d'autres outils provenant d'autres régions de la Concentration A indique un large éventail d'activités: travail de l'os, du bois de cervidé, du bois, découpe de la viande et de végétaux non ligneux.

Une mine d'informations

Nos analyses montrent que Meer II abrite les vestiges d'une seule phase d'occupation, datés d'il y a 8 900 ans environ.

La Concentration D était une aire de fabrication d'outils en silex destinés au travail de l'os et du bois de cerf. Deux artisans au moins y œuvrèrent, dont l'un était probablement gaucher. L'autre, qui était probablement droitier, transporta des outils et des supports de la Concentration D vers l'aire satellite A-1 de la Concentration A, où ces outils servirent principalement à un travail délicat sur de l'os.

La Concentration C était, du moins partiellement, une aire où des supports de silex étaient détachés des nucléus. Les supports retouchés pour être transformés en outils y sont rares, mais ce travail peut avoir été exécuté ailleurs.

La Concentration B est « excentrique » à plusieurs égards. Il paraît s'agir d'un dépotoir relié à une partie du site de Meer II détruite par la sablière.

La Concentration A avec ses satellites A-1 et A-2 correspond à tous points de vue à une unité domestique ou une habitation. On peut alléguer à l'appui de cette conclusion la variété des artefacts de silex qui y furent trouvés, le large éventail d'activités attesté par l'analyse des traces d'utilisation et les tâches spécialisées qui y furent entreprises, comme la préparation du cuir dans l'aire A-2 et le travail fin sur os dans l'aire A-1. La Concentration A est aussi le centre du réseau des liaisons découvertes par le remontage et elle renferme l'assemblage d'artefacts le plus important et le plus dense de Meer II.

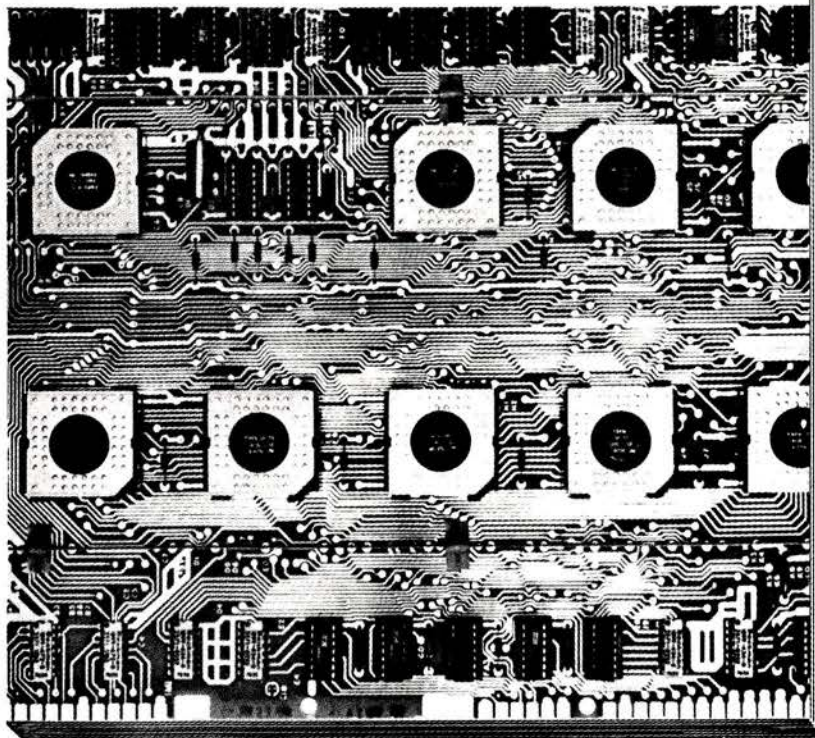
Que le lecteur se souvienne à présent que Meer II était un site dépourvu de structures archéologiques, que les vestiges organiques n'offraient rien à l'interprétation et que le matériel archéologique consistait essentiellement en une dispersion floue de pièces de silex. Une fouille soigneuse, le remontage et l'analyse des traces d'utilisation nous ont néanmoins permis d'en extraire une quantité substantielle d'informations. Les résultats obtenus à Meer II montrent clairement que même un site réputé « pauvre » en données archéologiques traditionnelles recèle potentiellement une énorme quantité d'informations sur des activités humaines appartenant à un passé lointain. ■

La révolution microélectronique

BIBLIOTHÈQUE

POUR LA
SCIENCE
édition française de
SCIENTIFIC
AMERICAN

diffusion Belin



La révolution microélectronique

Dans son développement tumultueux et explosif, la microélectronique devient un fait social qui modifie notre vie quotidienne.

Du fonctionnement du transistor aux possibilités des mini-microprocesseurs futurs, cet ouvrage expose les notions scientifiques à la base de ce bouleversement.

**commandez cet ouvrage
dès aujourd'hui**

(voir bon de commande p. 89)

BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

L'écologie sociale des coyotes

Leur mode de vie, en solitaire ou en bandes, dépend, semble-t-il, de la nature de leur alimentation. L'observation du comportement de ces animaux conduit à s'interroger sur les dangers réels qu'ils représentent pour le bétail.

par Marc Bekoff et Michael Wells

Les westerns ont imposé l'image du coyote solitaire, hurlant à la mort, en haut d'une lointaine colline. En réalité, les coyotes sont des créatures changeantes, aux comportements très divers. Leurs modes d'organisation sociale sont multiples. On rencontre aussi bien des individus solitaires et vagabonds (sauf durant la période de reproduction) que des groupes stables et grégaires qui vivent pendant de longues périodes dans la même région. Entre ces deux extrêmes, il existe des individus isolés et des couples qui tendent à se sédentariser. En réalité, un coyote peut présenter successivement tous ces comportements sociaux. Le meilleur moyen de comprendre cette remarquable souplesse dans les relations entre individus consiste à étudier leur écologie, c'est-à-dire les interactions entre ces animaux et leur environnement.

Il est couramment admis que la plupart des caractéristiques animales sont la résultante des interactions entre le milieu et des prédispositions génétiquement transmises. Bien que certaines tendances soient innées et correspondent à l'expression du patrimoine génétique de l'animal, nombre de caractéristiques observées se modifient sous l'effet du milieu environnant. On peut donc considérer qu'un grand nombre de comportements sont des adaptations au milieu dans lequel l'animal vit ou a vécu. L'éthologiste néerlandais Hans Kruuk a conclu après avoir étudié en détail le mode de vie des Hyènes, que la nature des ressources alimentaires est l'un des principaux facteurs régissant le comportement social de la plupart des grands carnivores (du moins pour ceux qu'aucun prédateur — hormis l'homme — ne menace directement). Les variations de sociabilité entre individus, observées au sein d'une même espèce de carnivores, résultent souvent de différences dans les comportements alimentaires.

Depuis trois ans nous nous som-

mes attachés à observer le comportement des coyotes dans leur milieu naturel. L'organisation sociale de ces animaux est effectivement le reflet de leurs moyens de subsistance; elle semble être sous la dépendance directe de trois variables: la taille des proies disponibles, leur répartition géographique et leur distribution selon les saisons. Cet article regroupe les observations que nous avons faites sur les adaptations spécifiques des coyotes face aux différentes disponibilités alimentaires, et sur les avantages qu'ils tirent de ces adaptations. Mais avant d'aborder le thème complexe des relations entre l'animal et son environnement, nous décrirons brièvement les coyotes eux-mêmes et le milieu dans lequel ils vivent.

Sur la piste des coyotes

Les Coyotes (*Canis latrans*) appartiennent à la même famille de Mammifères que les Chacals, les Renards, les Loups et les chiens domestiques. On connaît 19 sous-espèces de coyotes, mais la très grande mobilité actuelle de ces animaux et le nombre de plus en plus élevé de croisements entre individus de sous-espèces différentes, incitent les zoologistes à abandonner les anciennes classifications. Les coyotes s'accouplent une fois l'an et sont généralement monogames. Un même couple peut s'accoupler au même endroit pendant des années, retournant chaque fois dans la même tanière. Les coyotes mettent au monde leurs petits dans des trous qu'ils creusent eux-mêmes ou qu'ils empruntent à d'autres animaux. Les coyotes que nous avons observés utilisaient le plus souvent d'anciens terriers de blaireaux.

Donald Bowen de l'Université de Colombie britannique, a remarqué que les coyotes vivant en bandes dans la province canadienne de l'Alberta, ne se contentaient pas de manger, dormir et se déplacer en groupe,

mais établissaient également des relations de dominance. La même constatation a été faite par Franz Camenzind dans l'Ouest des États-Unis. En règle générale, les membres d'une bande sont plus sociables entre eux qu'envers des individus étrangers ou des coyotes solitaires résidant dans le voisinage ou traversant leur territoire. Il semble que les membres d'une même bande soient génétiquement liés. La cellule sociale de base est sans aucun doute constituée par un couple et les membres de sa descendance restés solidaires du groupe après avoir atteint l'âge adulte.

En règle générale, un seul mâle et une seule femelle élèvent les petits dans chaque bande. Parmi les individus non reproducteurs, certains participent à l'éducation d'autres membres du groupe, probablement leurs frères et sœurs plus jeunes. Ces animaux assurent aussi la garde des réserves de vivres du groupe. On trouve parfois, dans certains groupes, quelques individus parasites, descendant sans doute du couple reproducteur; ils restent au voisinage de la bande, mais sans participer directement à la vie sociale. Malgré les liens ténus qui les unissent au groupe, ces animaux tirent peut-être avantage de cette association en « héritant » d'un territoire de chasse après le départ ou la mort d'un parent.

On rencontre des coyotes au Canada, en Amérique centrale et dans la majeure partie des États-Unis. Ils manifestent des comportements sociaux extrêmement divers y compris dans une même zone géographique. Nos premières observations de coyotes en milieu naturel furent réalisées dans le Wyoming, au Nord-Ouest des États-Unis. Les animaux de cette région vivent pratiquement à l'abri de toute influence humaine, d'où l'intérêt des études éthologiques et écologiques qui y sont effectuées. Les observations faites dans cette région ont été complétées par d'autres



1. LES MEMBRES D'UNE BANDE DE COYOTES entourent la carcasse d'un élan. Les coyotes présentent une remarquable diversité d'organisations sociales : vagabonds solitaires, couples, groupes stables qui tendent à se fixer dans une région. Les études réalisées sur ces animaux à l'état sauvage montrent que la vie en bandes représente une adaptation au milieu, conditionnée en particulier par la présence

d'importantes réserves alimentaires, comme des charognes d'Ongulés (Mammifères à sabots). La vie solitaire est associée à la présence de petites proies vivantes comme les rongeurs (*voir figure 4*). On a rarement observé des coyotes attaquant de grands Ongulés vivants (élan, orignal...). L'élan dont on voit ici la carcasse dans la neige, n'a pas été tué par les coyotes.



2. CES JEUNES COYOTES âgés de trois semaines, doivent être nourris et protégés. Ils restent aux abords du terrier qui leur sert de tanière. Bien que les coyotes puissent creuser leur propre tanière, ils occupent souvent un ancien terrier de blaireau qu'ils agrandissent. A l'âge de deux ou trois mois, les jeunes coyotes commencent à

s'aventurer hors de la tanière et ils deviennent autonomes entre six et neuf mois. La plupart des membres d'une bande de coyotes sont parents, le couple étant probablement la structure sociale de base. Si les circonstances sont favorables, un ou plusieurs descendants restent avec les parents. En général, il n'y a qu'un couple reproducteur par bande.

informations recueillies dans le Colorado par Marc Bekoff, avec l'aide d'un certain nombre d'étudiants. Cette région constituait un milieu d'étude totalement différent de celui du Wyoming. La comparaison des deux séries d'observations nous a permis d'identifier la plupart des variables qui influent sur le comportement social des coyotes. Nous avons pratiqué également une série d'expériences sur des animaux captifs afin de contrôler plus efficacement les variables en jeu.

Il est important, lors d'une étude de ce genre, d'être en mesure de repérer un certain nombre d'individus au sein d'une population. Malheureusement, dans le cas des coyotes, les caractères distinctifs comme la taille (le mâle adulte pèse entre 8 et 20 kilogrammes) et la couleur de la fourrure (un mélange très variable de blanc, de gris, de brun et de roux) évoluent avec le temps. Par conséquent, nous avons dû capturer plusieurs coyotes pour les marquer. Nous avons utilisé des pièges dont les mâchoires avaient été entourées d'une épaisse couche de ouate afin d'éliminer les risques de blessure. Pour empêcher le coyote de se démenager dans le piège, nous plaçons sur celui-ci une pilule de calmant que l'animal avalait généralement au bout de quelques instants. Il se tenait alors tranquille sans toutefois devenir inconscient. Les coyotes ne restaient jamais prisonniers très longtemps car les pièges étaient visités toutes les six ou huit heures.

Une fois capturés, les coyotes se montraient extrêmement dociles. Avant de les relâcher, nous notions

le poids, la taille, le sexe, la condition physique et l'âge de l'animal. Nous plaçons alors sur chaque oreille une plaque d'identification colorée et nous fixons un collier émetteur sous le cou de l'animal. Nous pouvions ainsi reconnaître le coyote même quand il était hors de vue; de plus, nous savions quels étaient les coyotes vivant en bande. Toutefois, la région de Blacktail Butte dans le Parc National du Grand Teton, Wyoming (où nous avons effectué nos travaux), était suffisamment dégagée pour nous permettre d'observer les coyotes à l'œil nu, ou avec des jumelles. Les émetteurs radio servaient surtout à recueillir des informations concernant les déplacements d'individus isolés ou de groupes.

Ressources alimentaires et vie sociale

La nature des ressources alimentaires influe de multiples façons sur le comportement social des coyotes. On a constaté par exemple qu'en présence de proies de grande taille, comme des Ongulés (Mammifères pourvus de sabots), nombre de carnivores (loups, lions, chacals et chiens sauvages d'Afrique) se regroupent en bandes pour pratiquer la chasse collective. La vie en groupe est aussi une forme d'adaptation qui permet de défendre les fruits de la chasse contre d'éventuelles convoitises. Les observations de David McDonald, d'Oxford, montrent que les Chacals dorés d'Israël (*Canis aureus*) se regroupent pour veiller sur les réserves de charognes destinées à assurer

la nourriture des animaux durant plusieurs jours. Chez les coyotes, les chasses collectives sont rares et se soldent le plus souvent par un échec, du moins dans les conditions où nous les avons observées. En fait, de notre poste d'observation de Blacktail Butte, nous n'avons jamais vu un groupe de coyotes ou un individu isolé s'attaquer à un grand Ongulé. En revanche, nos observations comme celles de D. Bowen, indiquent que les coyotes se regroupent effectivement pour défendre leurs ressources alimentaires.

La nature des proies dont se nourrissent les coyotes de la zone de Blacktail Butte connaît d'importantes fluctuations saisonnières. Pendant l'été (c'est-à-dire de mai à octobre), les coyotes mangent surtout des Spermophiles, des mulots et des écureuils (*Spermophiles*). En « hiver » (de novembre à avril) la principale source de nourriture est constituée par des charognes d'Ongulés : cerfs, élan et Orignaux, dont la mort n'est nullement imputable aux coyotes. En d'autres termes, l'été les coyotes chassent et tuent de petites proies vivant sur leur territoire, tandis que l'hiver ils se nourrissent des cadavres de grands animaux (essentiellement des élan). Alors que les Mulots ou les Spermophiles se rencontrent dans toute cette région, les carcasses d'élan sont concentrées en quelques points précis. Cette accumulation de charogne en hiver résulte de deux causes : d'une part les élan vivent en hordes et d'autre part c'est pendant cette période qu'ils sont victimes des chasseurs. L'augmentation du nombre de cadavres en hiver est en outre



3. UN MEMBRE DE LA BANDE défend une charogne (non visible sur la photographie) des convoitises d'un coyote étranger au groupe. L'animal montre les dents et hérisse le poil. Les deux coyotes de

droite appartiennent au groupe; ils restent en sécurité à proximité de la charogne. La vie en bande permet de défendre avec succès les réserves de nourriture; c'est l'un de ses principaux avantages.

un phénomène fréquent dû, en partie, au fort taux de mortalité des Ongulés pendant la saison froide.

Si nos hypothèses sur le rôle de la nourriture (taille des proies, répartition saisonnière et géographique) dans l'organisation sociale des coyotes se confirment, on devrait observer des variations non seulement entre des groupes disposant de ressources alimentaires différentes mais aussi, d'une saison à l'autre, au sein d'un même groupe. Afin de déterminer les effets des fluctuations saisonnières du nombre des proies, nous avons comparé l'importance des groupes de coyotes en hiver et en été. Entre septembre 1977 et août 1979, nous avons procédé à plus de mille repérages portant sur 35 coyotes marqués et 15 coyotes non marqués. Nous avons constaté qu'en été, lorsque les Rongeurs sont la principale source de nourriture, la taille moyenne des bandes de coyotes est de 1,3 individu. En hiver cette moyenne atteint 1,8 individu. La présence de proies de grande taille, relativement groupées, s'accompagne donc d'une plus grande sociabilité des coyotes.

En outre, nous avons fait une autre découverte intéressante quand nous avons comparé nos observations avec celles de F. Camenzind sur les coyotes du *National Elk Refuge*. Le champ d'investigation de F. Camenzind n'était qu'à sept kilomètres du nôtre, cependant le nombre d'élan hivernant dans ce secteur était beaucoup plus important. Les cadavres d'Ongulés y étaient donc plus nombreux et plus fréquents. Selon F. Camenzind, la taille moyenne des bandes de coyotes dans ce secteur atteignait 1,6 individu en été et 3 en hiver. Ces observations montrent que l'accroissement du nombre de charognes disponibles accroît non seulement la sociabilité des animaux en hiver mais a un effet cumulatif en augmentant le grégarisme des coyotes pendant l'été suivant. Durant trois hivers consécutifs, les coyotes vivant dans le Parc National des Montagnes Rocheuses, dans le Colorado, ne trouvèrent presque aucun cadavre d'Ongulé. Pour survivre, ils durent chasser de petits rongeurs, comme en plein été. La taille moyenne des bandes est alors restée voisine de 1,1 individu toute l'année.

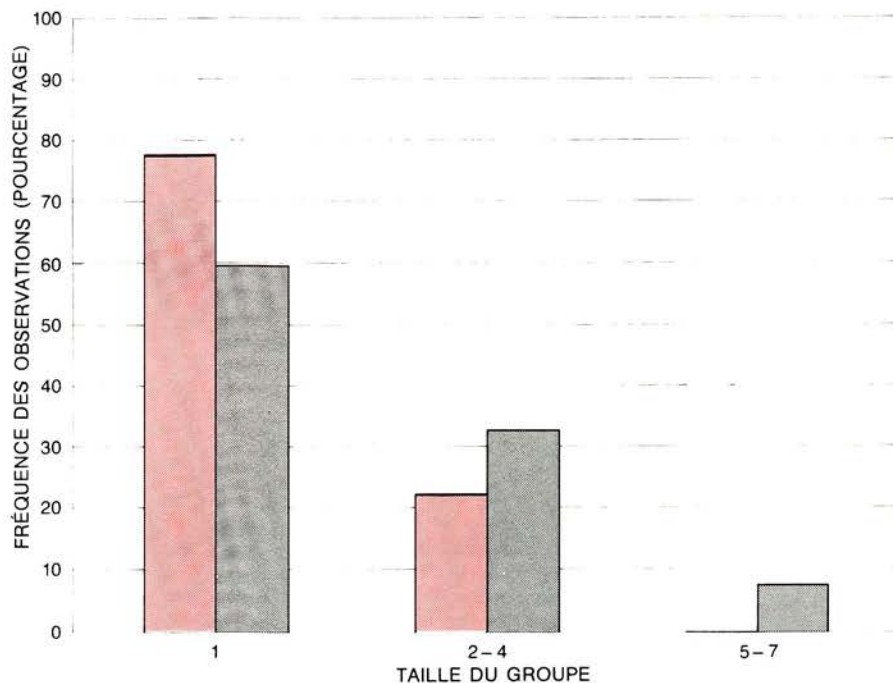
Nous avons aussi comparé la fréquence d'apparition, au cours de l'année, des différentes structures sociales des coyotes : individu isolé, couple, groupe de trois individus ou plus. Dans la zone de Blacktail Butte, 35 pour cent des observations concernaient des groupes d'au moins trois individus et 50 pour cent des animaux isolés. Ces derniers traversaient le territoire occupé par un couple (ou par une bande plus importante) ou vivaient aux confins de la région étudiée. Dans la zone voisine, riche en dépouilles d'élan, 15 pour

cent seulement des observations de F. Camenzind se rapportaient à des individus isolés et 60 pour cent à des bandes de trois animaux ou plus. Par conséquent, là où les charognes d'Ongulés sont peu nombreuses et très localisées, peu de coyotes peuvent se rassembler en bandes et profiter de ces réserves de vivres. Les autres coyotes, non intégrés dans les bandes qui défendent les rares charognes disponibles, doivent parcourir la région, seuls ou par couple, à la recherche de leur nourriture. Les observations faites dans le Parc National des Rocheuses confirment ces conclusions. Dans ce secteur où il n'y a presque pas de charognes d'Ongulés, 97 pour cent des observations concernent des animaux isolés.

Il n'est guère nécessaire d'étendre la surface des régions étudiées pour avoir une idée plus précise des structures sociales des coyotes et pour saisir les avantages présentés par cette association pour la défense des ressources alimentaires. En effet, les informations recueillies au cours des trois dernières années sur les populations des coyotes vivant dans des « domaines vitaux » voisins, confirment l'impact de la nourriture sur leurs structures sociales. (Le domaine vital d'un animal est l'espace qu'il parcourt d'ordinaire dans ses activités quotidiennes.)

Durant l'hiver 1978-1979 on a enregistré d'importantes différences dans les quantités de charognes d'élan disponibles sur deux domaines vitaux. Tout à fait par hasard (puisque nous n'avons jamais cherché à

contrôler la répartition et le nombre des charognes), il s'est trouvé qu'un premier groupe de coyotes, le groupe A disposait de 17 pour cent des charognes contre 83 pour cent pour un second groupe, le groupe B. Comme nous pouvions nous y attendre, le groupe A était le plus petit puisqu'il ne se composait, entre novembre 1978 et avril 1979, que d'un seul couple, les petits des années précédentes s'étant dispersés aux alentours. Pendant la même période, le groupe B se composait de quatre individus : un couple et deux descendants mâles (un adulte, né en 1977 et un jeune né en 1978). L'aîné participait à l'éducation de son frère et de sa sœur nés en 1978. Ce groupe comprenait également deux femelles « parasites », l'une née du couple reproducteur en 1978 et l'autre qui serait née, d'après nos estimations, en 1977 (toujours du même couple). Les deux femelles entretenaient très peu de relations avec les autres membres de la bande; elles étaient pourtant autorisées à vivre dans leur voisinage. Entre novembre 1978 et mai 1979 (et même plus tard) les quatre membres du groupe B ont fait preuve d'une parfaite cohésion, mangeant, dormant, se déplaçant et défendant les charognes en étroite collaboration. Durant cette période les membres du groupe n'ont guère été aperçus séparément; six pour cent des observations seulement se rapportent à des animaux isolés. En revanche, 50 pour cent des observations concernaient les quatre animaux ensemble.



4. LA SOCIABILITE DES COYOTES varie selon les saisons en fonction des disponibilités alimentaires. Ce graphique permet de comparer la fréquence relative, en été et en hiver, des observations sur la composition des bandes de coyotes. Dans l'Ouest des Etats-Unis où ces observations ont été réalisées, l'été va de mai à octobre et l'hiver de novembre à avril. En été (en couleur) où les coyotes capturent des proies de petite taille (comme des rongeurs), leur sociabilité est moindre qu'en hiver (en gris) où la nourriture est souvent à base de charognes d'Ongulés.

De novembre à avril, le mâle et la femelle du groupe A ont été vus ensemble dans 71 pour cent des cas. Le reste du temps, chacun d'eux vivait à proximité d'autres coyotes, mais sans jamais s'associer réellement avec eux.

Quand deux coyotes (autres qu'un couple légitime) passent l'hiver ensemble, il y a de fortes chances

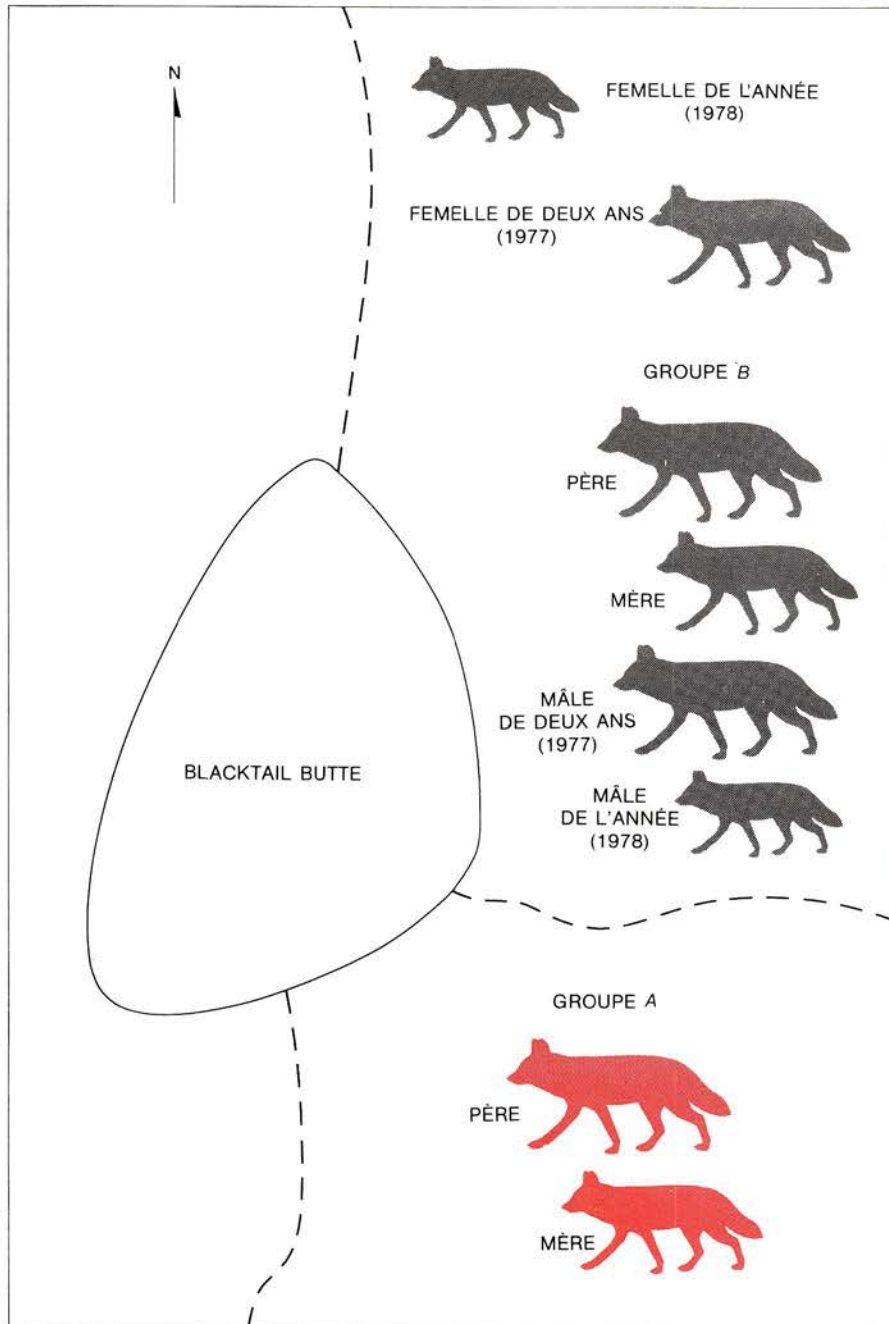
pour qu'ils restent unis durant l'été suivant. Les observations réalisées à Blacktail Butte montrent que les rejets les plus âgés continuent à partager (du moins en partie) le domaine vital de leurs parents quand les réserves de vivres disponibles durant l'hiver sont en suffisance. Si la cellule familiale reste unie pendant la mauvaise saison, il n'est pas rare que les

jeunes coyotes demeurent une année de plus sur le territoire de leurs parents. Nous avons eu l'occasion d'observer en détail ce comportement. En effet, deux jeunes coyotes qui avaient quitté le domaine du groupe A pendant l'automne 1978, sont retournés vivre dans ce secteur au début du printemps 1979. Leur retour coïncidait avec l'augmentation saisonnière du nombre des rongeurs sur le domaine vital des parents. Ces coyotes, d'un an, vécurent toujours en solitaires sans participer à l'éducation de leurs cadets. D'une manière générale, les rapports entre jeunes et adultes, pendant l'été 1979, furent beaucoup moins étroits dans le groupe A que dans le groupe B où les jeunes du même âge avaient passé l'hiver avec leurs parents.

Pendant l'hiver 1979-1980, nous avons découvert un autre aspect des relations entre la quantité de nourriture disponible et l'organisation sociale des coyotes. Les deux années précédentes d'importantes chutes de neige s'étaient produites en décembre, mais en 1980 il fallut attendre la fin de janvier pour que la neige recouvre les domaines vitaux des groupes A et B. Des quantités inhabituelles de rongeurs vinrent s'ajouter aux ressources hivernales habituelles (charognes d'Ongulés). Contrairement aux hivers précédents, un des jeunes du couple A, né en avril 1979, continuait encore à vivre avec ses parents en février 1980. Les années précédentes, les jeunes s'étaient dispersés au mois de novembre. De même, le groupe B abritait toujours, en février dernier, trois jeunes nés en avril 1979. Il nous apparut dès lors que toute modification dans les ressources alimentaires des coyotes provoquait un changement dans leur organisation sociale, du moins pendant un certain temps.

La veille aux frontières

Le mode d'association entre les coyotes n'est pas le seul trait du comportement social affecté par les fluctuations des ressources alimentaires. Ces changements affectent aussi la manière dont les animaux utilisent l'espace. Avant de poursuivre cette analyse, il importe de distinguer le territoire et le domaine vital (l'espace parcouru par un individu ou un groupe organisé lors de ses déplacements quotidiens). Les limites du domaine vital sont fluctuantes; en outre, elles sont franchissables. Il n'est donc pas rare que les domaines vitaux de différents groupes ou d'individus isolés se chevauchent. En revanche, le territoire se définit comme la surface occupée et défendue par un ou plusieurs animaux et sur laquelle aucun autre individu étranger à la structure sociale n'est



5. DEUX GROUPES DE COYOTES, occupant des domaines vitaux contigus près de Blacktail Butte dans le Wyoming, disposèrent de quantités différentes de charogne d'élan durant l'hiver 1978-1979. Le domaine du groupe A ne renfermait que 17 pour cent des charognes disponibles dans la région, contre 83 pour cent dans celui du groupe B. Ces différences affectaient directement la taille des groupes. Le groupe A (en couleur) était formé d'un seul couple, tous les descendants des années passées s'étant dispersés au début de l'hiver. Le groupe B (en gris) se composait d'un couple et de deux rejets mâles, l'un de deux ans (né en 1977) et l'autre d'un an (né en 1978). La vie en bande, outre qu'elle favorise la préservation des ressources alimentaires, permet également à la femelle reproductrice de prendre soin de ses petits. Dans le groupe B, le mâle de deux ans a participé à l'éducation de son frère né en 1978. La bande a accepté deux « parasites » : une femelle née du couple en 1978 et une autre femelle de deux ans qui serait, elle aussi, la fille du couple reproducteur de la bande. Ces deux coyotes eurent très peu de rapports avec leurs parents ou leurs frères; néanmoins, ils étaient autorisés à vivre auprès d'eux.

toléré. Dans certaines régions, les coyotes défendent activement leur territoire, mais ce type de comportement n'est pas universel. D'après nos observations, les coyotes vivant en bandes seraient les seuls à manifester un comportement territorial; en revanche, les animaux isolés sédentaires ou les couples n'auraient pas cette attitude.

Revenons aux deux groupes de coyotes vivant dans la région de Blacktail Butte. Les quatre membres du groupe B occupent un territoire adjacent à celui du groupe A (le couple). La limite entre ces deux zones forme une frontière clairement définie. Les coyotes du groupe B ont chassé de nombreux congénères de leur territoire, allant parfois jusqu'à poursuivre les intrus sur deux ou trois kilomètres. Cette ardeur confinait parfois à la rage! Ainsi, en avril 1979, la femelle reproductrice du groupe qui venait de mettre bas quelques jours auparavant pourchassa un de ces intrus sur plus d'un kilomètre. A son retour à la tanière, le mâle prit le relais et poursuivait le visiteur indolent sur une distance de trois kilomètres. En revanche, les deux membres du groupe A n'ont jamais défendu, à notre connaissance, leur domaine vital. Ces observations et les résultats d'autres chercheurs montrent que l'acharnement des coyotes, seuls ou en bande, à défendre un territoire, croît en fonction des ressources alimentaires qu'il renferme.

Lorsque la nourriture vient à manquer, les limites des territoires et des domaines vitaux contigus sont souvent franchies par des animaux en quête de nourriture. Plus une zone s'avère riche en proies ou en charognes, plus le nombre des violations de frontières est important dans ce secteur. Prenons un exemple: pendant tout le temps de nos observations, le couple A a effectué de fréquentes incursions sur le territoire du groupe B; en revanche, aucun membre du groupe B n'a pénétré sur le domaine vital du couple A. En fait, les membres de la bande quittent rarement leur territoire, ce qui n'est guère étonnant compte tenu de la profusion de charognes d'Ongulés qu'il abrite.

Les dimensions des domaines vitaux et des territoires des coyotes varient considérablement selon la région, la saison, l'année, l'âge et le sexe des animaux. Toutefois ces variations sont loin d'être uniformes. D'après une estimation effectuée dans la région de Blacktail Butte sur dix coyotes adultes, la superficie moyenne d'un domaine vital est d'environ 21,1 kilomètres carrés. Cette valeur est indépendante du sexe; en revanche, le mode d'organisation sociale des coyotes influe sur la taille des domaines vitaux. Comme nous l'avons déjà mentionné, les animaux solitaires et les couples n'ont pas

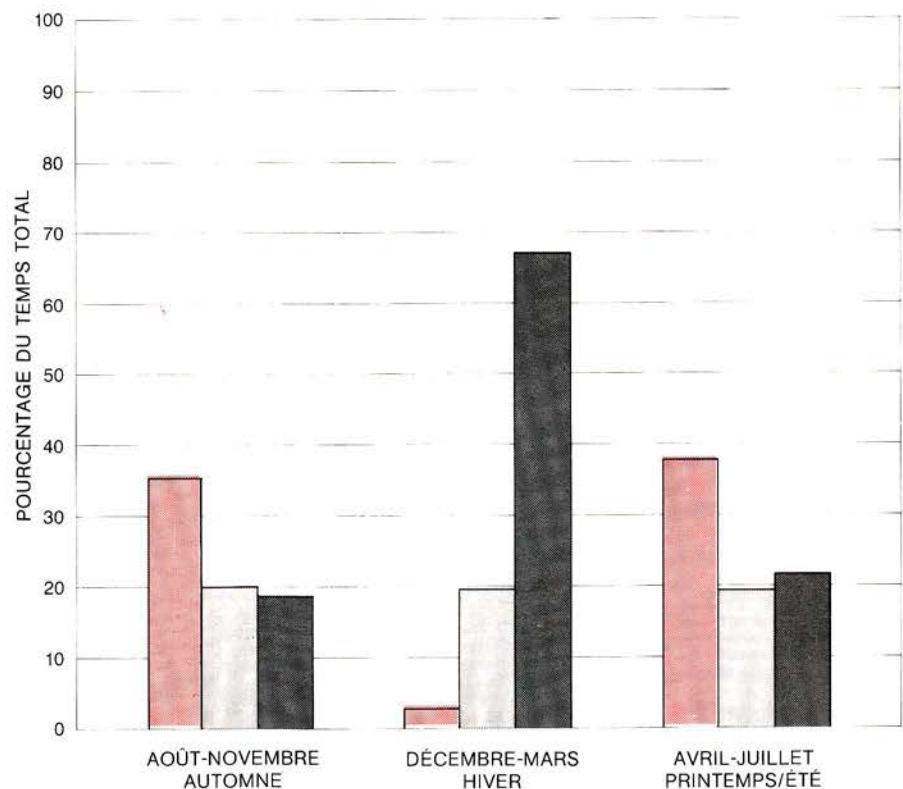
accès aux charognes pendant l'hiver. Pour se nourrir, ils disposent de domaines plus vastes dont la superficie atteint 30 kilomètres carrés. A l'inverse, les individus regroupés en bandes possèdent des vivres abondantes (qu'ils défendent avec acharnement); ils ont donc tendance à ne pas quitter leur territoire. En général celui-ci ne dépasse pas 15 kilomètres carrés, et ses dimensions sont beaucoup moins sujettes à variation puisque les charognes d'Ongulés sont souvent groupées dans des secteurs bien précis.

Les à-côtés de la vie de groupe

Si la vie en bande permet une défense plus efficace des ressources alimentaires pendant l'hiver, elle présente aussi d'autres avantages lors de la période de reproduction. Chez les coyotes, l'accouplement a généralement lieu entre janvier et avril, la date variant d'une région à l'autre. La fécondité de la femelle et les chances de survie des petits sont fonction de son état de santé; or sa santé est étroitement dépendante de la quantité et de la qualité de la nourriture dont elle dispose avant et pendant la gestation (donc durant

l'hiver). De ce point de vue, les femelles vivant au sein d'une bande sont privilégiées.

D'autres résultats intéressants apparaissent lorsqu'on compare l'emploi du temps des coyotes en été et en hiver. D'habitude les coyotes déploient un maximum d'activité tôt le matin et tard le soir. Pour en savoir plus, nous avons comparé, chez 50 coyotes différents, le temps consacré à la chasse et au repos; 35 d'entre eux étaient identifiés au moyen de repères de couleur numérotés (voir l'illustration de couverture). En hiver, lorsque les coyotes se nourrissent principalement de charognes d'élan, les animaux chassent moins et se reposent davantage qu'en été où il leur faut découvrir et attraper de petits rongeurs. L'augmentation du temps de repos par rapport à celui de chasse profite aux femelles reproductrices qui accumulent ainsi les réserves énergétiques nécessaires à la gestation. Celle-ci dure neuf semaines et chaque portée de coyotes comporte en moyenne six petits. A la naissance, les jeunes sont très dépendants de leurs parents: ils les nourrissent et assurent leur protection. Les femelles intégrées à un groupe bénéficient donc d'un environnement plus favorable; elles devraient donc avoir



6. LE TEMPS CONSACRÉ par les coyotes à chaque activité vitale varie selon les saisons. Dans ce graphique on ne tient compte que du temps passé à la chasse (en couleur), des déplacements (en gris clair) et des périodes de repos (en gris foncé). En hiver, quand les coyotes vivent essentiellement des charognes d'élan, ils chassent moins et se reposent plus. En général les coyotes s'accouplent pendant les mois d'hiver et leur relative inactivité profite aux femelles reproductrices qui se reposent ainsi pendant la gestation. Une comparaison entre les périodes de repos et les déplacements montre qu'en hiver les animaux vivant en bande se dépensent moins que les couples isolés (voir figure 7). Les pourcentages relatifs indiqués ici sont calculés à partir d'un total de 668 heures-coyotes d'observation, entre septembre 1977 et août 1979. (Une heure-coyote correspond à l'observation d'un coyote pendant une heure.)

une fertilité supérieure à leurs congénères vivant seules ou avec un compagnon. Par ailleurs, ces femelles trouvent de l'aide à l'intérieur du groupe pour l'éducation de leur progéniture.

Certaines données concernant les Chacals dorés et les Hyènes corroborent nos propres observations sur les coyotes. En rassemblant toutes ces informations, nous avons établi quelques conclusions générales qu'il serait intéressant de vérifier sur d'autres espèces de carnivores. Quand on compare les animaux disposant de ressources alimentaires suffisantes pendant l'hiver avec ceux vivant dans une zone offrant peu de nourriture, on constate que les premiers : (1) manifestent un comportement plus social et font preuve d'une plus grande cohésion, (2) témoignent d'un comportement territorial et défendent avec acharnement leurs réserves de vivres, (3) occupent un domaine vital plus restreint, (4) subissent plus fréquemment les attaques de leurs congénères (là où la nourriture est abondante), enfin (5) se déplacent moins et se reposent davantage en hiver.

Les différents avantages de la vie en groupe peuvent donc se résumer ainsi : (1) protection plus efficace des ressources alimentaires, en particulier durant l'hiver; (2) repérage plus aisé de ces ressources; (3) moindre dépense d'énergie individuelle, bénéfi-

que surtout aux femelles reproductrices; (4) collaboration d'autres individus (le plus souvent les aînés) à la défense, l'alimentation et l'éducation des petits. Nous n'avons toutefois pu établir aucune relation entre la taille des proies chassées et le mode de vie des coyotes (en solitaire, en couple ou en bande); cette question est d'ailleurs controversée.

Une vue perçante

Jusqu'à présent nous nous sommes surtout intéressés aux coyotes vivant en bandes, formule adaptée à la protection de certains types de ressources alimentaires; cependant, la vie en solitaire représente elle aussi une certaine forme d'adaptation aux circonstances. Les rongeurs sont les principales victimes des coyotes : or, ce butin ne peut être défendu contre les appétits d'autres coyotes; le partage de la nourriture s'avère donc difficile, sauf avec les petits. Selon nos observations, les coyotes, même membres d'une bande, redeviennent temporairement solitaires lorsqu'ils chassent des rongeurs. Les différents comportements associés à ce mode de chasse méritent notre attention, au même titre que ceux concernant la vie en bande.

On ne sait pas grand-chose de la

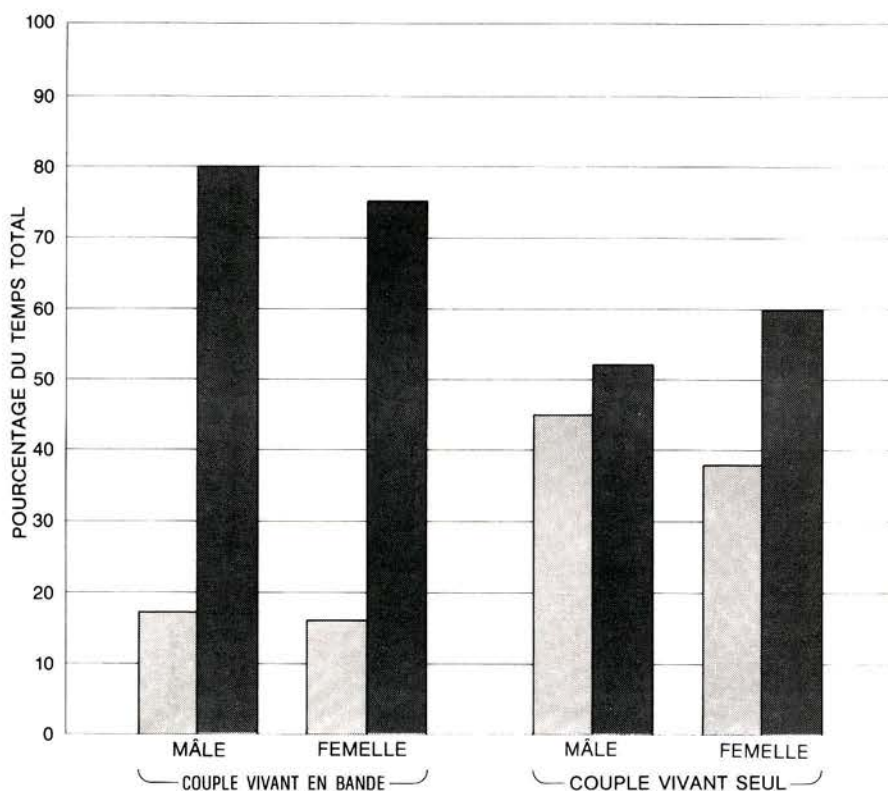
manière dont les coyotes repèrent et capturent leurs proies; aussi, avons-nous fait un certain nombre d'expériences pour tenter d'en savoir davantage.

Le processus de localisation des proies est un phénomène complexe qui varie considérablement d'une espèce de carnivores à l'autre. De toute évidence, des stimuli visuels, auditifs et olfactifs interviennent et, en milieu naturel, c'est probablement leur interaction qui déclenche le comportement prédateur. Il serait néanmoins intéressant de connaître, chez les coyotes, l'importance relative de ces trois types de stimuli, puis d'établir le lien entre ces résultats et l'écologie de l'espèce. Il est préférable d'effectuer ce type d'étude sur des coyotes captifs dans des conditions permettant un contrôle rigoureux des stimuli externes.

La première série d'expériences fut réalisée à l'Université du Colorado par Philip Lehner. Les coyotes étaient placés dans une petite pièce de 30 mètres carrés où était caché un lapin. On a essayé diverses combinaisons des trois types de stimuli en notant à chaque fois le temps nécessaire aux coyotes pour découvrir le lapin. L'extinction des lumières dans la pièce (les coyotes étaient alors surveillés par une caméra infrarouge), permettait d'éliminer les stimuli visuels. L'utilisation d'un lapin mort supprimait les stimuli auditifs. Enfin, l'élimination des stimuli olfactifs s'obtenait soit en masquant l'odeur de la proie (la pièce étant imprégnée des odeurs de toute une colonie de lapins), ou en aspergeant les muqueuses nasales des coyotes avec une solution de sulfate de zinc.

L'absence de stimuli auditifs et olfactifs n'augmente guère le temps mis par le coyote pour découvrir sa proie : 5,6 secondes en moyenne avec les seuls stimuli visuels, contre 4,4 secondes dans les conditions normales. En revanche, si les stimuli auditifs et olfactifs sont maintenus et les stimuli visuels éliminés, le temps passe à 36,1 secondes (soit huit fois le temps de base). En présence des seuls stimuli auditifs, les coyotes mettent 28,8 secondes à chercher la proie et 81,1 secondes avec les seuls indices olfactifs. En l'absence des trois types de stimuli, les coyotes témoins mettent 154,8 secondes (plus de deux minutes et demie) pour attraper le lapin en procédant alors par recherche tactile.

Une première conclusion s'impose : par ordre d'importance décroissante, les trois facteurs servant au repérage des proies sont la vue, l'ouïe et l'odorat. D'autres séries d'expériences confirment d'ailleurs la prépondérance des stimuli visuels; quand des coyotes sont mis en présence de deux lapins (l'un est visible mais totalement silencieux, l'autre est dissimulé aux regards mais repérable grâce à certains



7. UNE FEMELLE REPRODUCTRICE intégrée dans une bande dispose, pendant l'hiver, de périodes de repos (en gris sombre) plus importantes qu'une femelle vivant en couple. Celle-ci consacre en outre plus de temps à ses déplacements (en gris clair). Ce graphique a été tracé à partir d'observations recueillies près de Blacktail Butte sur un couple isolé (groupe A) et sur une bande de coyotes (groupe B) (voir figure 5). Les femelles vivant en bande ne semblent pas plus fécondes que les autres; elles évitent simplement de fournir certains efforts (recherche de la nourriture). Elles disposent ainsi d'un avantage au plan de la reproduction quand la nourriture intervient comme facteur limitant.

bruits), on constate que les coyotes capturent d'abord le lapin visible. Peut-être s'agit-il là d'une adaptation au milieu naturel des coyotes : des plaines découvertes où l'herbe rase ne cache pas les proies ?

Nous avons effectué des expériences similaires dans des conditions plus proches du milieu naturel. Pour cela utilisé un enclos de 6 400 mètres carrés. Le temps nécessaire au repérage des proies croissait avec l'augmentation des distances et la multiplication des facteurs susceptibles de détourner l'attention des coyotes. Ces expériences confirmèrent le rôle primordial de la vision dans les processus de localisation des proies. En revanche, les parts relatives de l'ouïe et de l'odorat étaient inversées, les stimuli olfactifs s'avérant plus efficaces que les stimuli auditifs. Lorsque les coyotes n'étaient guidés que par la vue et l'odorat, ils mettaient 34,5 secondes en moyenne pour découvrir une proie; en revanche, il leur fallait 43,7 secondes en utilisant les informations visuelles et auditives. Avec les seuls indices olfactifs, la localisation des proies se faisait en 72,7 secondes contre 208,8 secondes avec les seuls indices auditifs. En combinant l'ensemble des stimuli, les coyotes arrivaient à débusquer leur proie en 30,1 secondes. Sans informations exté-

rieures, il leur fallait 22,2 minutes pour aboutir au même résultat.

Les différences entre les résultats obtenus en laboratoire et ceux mesurés en plein air s'expliquent par les effets du vent. Les stimuli olfactifs représentent pour les coyotes des indices directionnels importants : on comprend dès lors qu'à l'extérieur l'odorat prime sur l'ouïe. Dans 83,9 pour cent des cas (47 fois sur 56), l'approche de la proie (ici un lapin) se faisait sous le vent. Nous avons fait les mêmes constatations, en milieu naturel, dans le Parc National du Grand Teton. Dans 75 pour cent des cas, les coyotes s'approchaient des souris sous le vent. De plus, lors d'expériences réalisées en plein air, nous avons découvert que la distance à partir de laquelle les coyotes prenaient conscience de la présence d'un lapin dépendait de la vitesse du vent (dans le cas où les stimuli olfactifs étaient seuls à intervenir). Plus précisément, cette distance augmente avec la vitesse du vent : elle n'est que de deux mètres avec un vent de dix kilomètres à l'heure mais elle atteint cinq mètres lorsque le vent dépasse 40 kilomètres à l'heure.

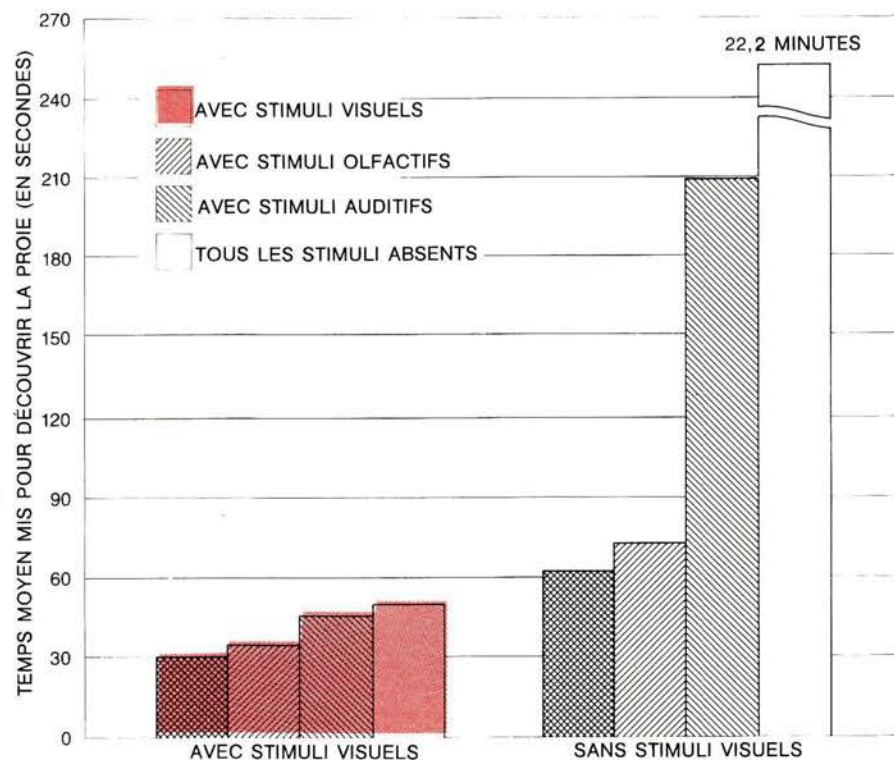
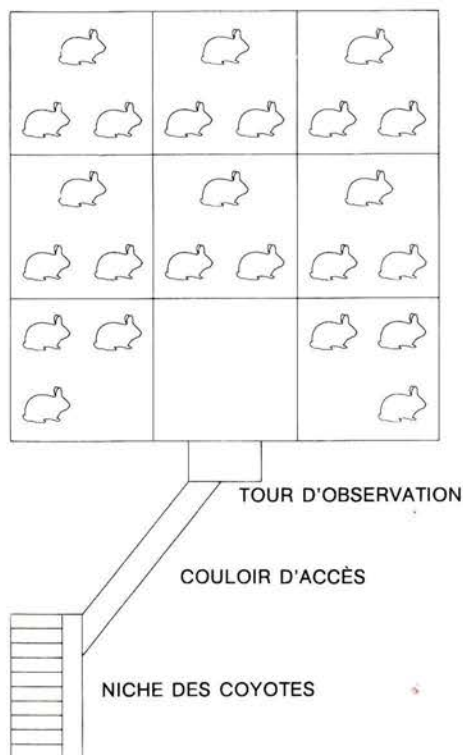
En conclusion, le coyote chasse en utilisant en priorité les informations transmises par son système visuel. Il dispose néanmoins de systèmes senso-

riels annexes, très efficaces, qui renseignent l'animal quand certains indices visuels manquent ou sont insuffisants. Si la proie est visible la poursuite démarre généralement avant l'intervention des indices auditifs et olfactifs. Dans le cas contraire, le coyote associe sans doute les perceptions auditives et olfactives, selon un rapport défini par les conditions de vent et les bruits émis par la proie. Les coyotes sont des prédateurs redoutables qui modifient leur technique de chasse pour tirer le meilleur parti des conditions du milieu.

La stratégie du coyote

Comment le coyote s'y prend-il pour capturer et tuer la proie qu'il vient de repérer? La réponse intéresse, bien sûr, les biologistes qui étudient les différents aspects du comportement prédateur mais aussi tous ceux qui cherchent à contrôler les populations de prédateurs. Il convient ici d'établir une distinction entre les proies plus petites et celles plus grandes que le coyote. Les coyotes s'attaquent parfois à des animaux de grande taille, mais cette forme de prédation est assez rare.

L'action prédatrice des coyotes



8. CE DISPOSITIF EXPERIMENTAL (à gauche) sert à préciser l'importance relative des stimuli visuels, olfactifs et auditifs dans le repérage des proies par les coyotes. Lors de chaque expérience, on place un lapin, au hasard, dans l'un des 24 sites délimités à l'intérieur de l'enclos. Cet enclos de plein air mesure 6 400 mètres carrés. On laisse alors entrer le coyote et l'on mesure le temps mis à découvrir le lapin. Les expériences ont été effectuées avec cinq coyotes différents. Toutes les combinaisons possibles (absence ou présence) des trois types de stimuli sensoriels ont été réalisées. En effectuant de nuit certaines expériences, on éliminait les perceptions visuelles. Les animaux étaient

alors surveillés grâce à des jumelles spéciales. Pour supprimer les stimuli auditifs, on utilisait un lapin mort. Quant aux perceptions olfactives, on les inhibait en appliquant une solution de sulfate de zinc sur les muqueuses nasales des coyotes. Sur le schéma de droite on a reporté les temps mis en moyenne par les coyotes pour localiser des proies dans ces différentes conditions. Les résultats des expériences menées en présence des stimuli visuels sont indiqués en couleur. Ils sont séparés des expériences réalisées en l'absence des indices visuels. La vue apparaît ainsi comme le facteur primordial pour localiser les proies. L'ouïe est moins importante.

vis-à-vis de proies de petite taille, des rongeurs par exemple, se décompose en sept phases distinctes. Citons dans l'ordre : la recherche à distance (le coyote parcourt de vastes espaces, scrutant le sol à la recherche d'un indice); la recherche rapprochée (le coyote fouille alors la surface du sol); l'orientation (il se met en posture d'alerte, flairant et dressant les oreilles pour déterminer l'emplacement précis de la proie convoitée); l'approche furtive, lente et à pas feutrés; la ruée (le coyote fait un bond rapide vers la proie); l'attaque (il se dresse sur ses pattes postérieures puis tombe sur ses pattes antérieures afin de clouer la proie au sol) et pour finir, le coup de grâce. Les coyotes tuent les petites proies (tels les rongeurs) en les mordant à la tête ou à la nuque; il leur arrive parfois de secouer violemment la proie de droite à gauche.

On n'observe pas toujours l'ensemble de ces phases. Si la proie est de très petite taille (un mulot, par exemple), il n'y a pas de ruée; le coyote se contente de s'approcher de la proie et de s'en saisir en la clouant au sol avant de lui porter un coup mortel. Pour un rongeur de plus grande taille (comme le *Spermophile* de Richardson ou l'Uinta), neuf fois sur dix le coyote bondit sur la proie sans chercher à la clouer au sol.

Le succès de ces opérations de chasse est variable. Nous avons enregistré entre 10 et 50 pour cent de réussites. Nous n'avons pas encore identifié toutes les variables qui conditionnent la réussite des opérations. Il semble que les *Spermophiles* soient plus faciles à capturer que les mulots. La faim serait également un facteur important : on a remarqué qu'en captivité, des coyotes rassasiés commencent par jouer avec leur proie avant de la tuer et de la manger. Nombre de petits rongeurs parviennent ainsi à s'échapper. Des observations similaires ont été faites en milieu naturel.

L'habileté manœuvrière des coyotes augmente-t-elle avec l'âge? Pour répondre à cette question nous avons comparé, chez neuf jeunes (âgés de trois à six mois) et 15 adultes, le temps nécessaire pour découvrir et capturer des mulots et des *Spermophiles*. Selon nos observations, les adultes mettent moins de temps à chercher et à repérer une proie; en outre, la durée totale des premières phases de la chasse est assez constante. En revanche, la phase d'approche dure 5,5 secondes en moyenne chez les jeunes comme chez les adultes. Les jeunes manquent donc un peu d'expérience pour localiser les proies, mais une fois celles-ci repérées, l'approche et l'attaque sont toujours très brèves. On a constaté qu'en captivité, des coyotes âgés d'un mois seulement, parvenaient déjà à s'emparer d'une souris. Bien que des animaux

aussi jeunes n'aient jamais eu l'occasion de tuer une petite proie dans des conditions naturelles, ils s'avèrent spontanément capables de le faire.

On ne dispose guère d'informations sur la manière dont les coyotes chassent des proies de grande taille comme des moutons, des cerfs, des élan ou des orignaux. Plusieurs raisons expliquent ce manque de données. D'abord, la distinction est pratiquement impossible entre les proies tuées par les coyotes et celles victimes d'autres prédateurs, voire de chiens errants. On a aussi constaté que la plupart des Ongulés bien portants vivant à proximité de coyotes, sont à même de se défendre. Les coyotes s'attaquent très peu souvent à des proies de grande taille et il est donc difficile d'observer ce type de chasse. Les rares observations dont nous disposons indiquent qu'il ne faut pas moins de deux coyotes, voire davantage, pour venir à bout d'un cerf adulte en bonne santé. Dans la plupart des cas les coyotes ne tuent que de jeunes Ongulés ou des bêtes malades. Ils attaquent l'animal à la tête, au cou, au ventre ou à la croupe. La plupart des scientifiques admettent cependant que les coyotes ne portent aucun préjudice aux populations d'Ongulés sauvages.

La mauvaise réputation

L'action prédatrice des coyotes sur les troupeaux de moutons domestiques est en revanche plus difficile à cerner. Dès que nous abordons ce problème, nous plongeons dans des controverses concernant le contrôle et la surveillance des populations de coyotes. Nombre de fermiers américains considèrent les coyotes comme des animaux nuisibles. Depuis un siècle, le coyote est l'une des cibles préférées des programmes visant à détruire les prédateurs des troupeaux domestiques. A l'heure actuelle, une somme énorme d'efforts, de temps et d'argent (provenant souvent de fonds publics) sont consacrés à cette répression. Les résultats de cette lutte sont décevants, tant au niveau de la réduction des populations de coyotes que de la prévention des actions prédatrices vis-à-vis du bétail. L'échec de tels programmes résulte en priorité de l'insuffisance des informations concernant la dynamique et le comportement des populations de coyotes.

Nous ne savons presque rien des pratiques cynégétiques des coyotes à l'égard des moutons. Guy Connolly et ses collaborateurs du Centre américain d'étude et de préservation de la vie sauvage, ont montré que les coyotes, même enfermés avec des moutons (situation idéale... pour le coyote bien évidemment), se révèlent être des chasseurs étonnamment inefficaces. Pendant ces expériences, les coyotes n'ont réussi à tuer leur proie

qu'une fois sur deux (dans 20 affrontements sur 38 au total). Le temps moyen nécessaire pour attraper un mouton (47 minutes), puis pour le tuer (13 minutes) était extrêmement long (une heure au total). Les attitudes de défense du mouton n'ont découragé les coyotes que dans 31,6 pour cent des cas, elles expliquent cependant la longueur des affrontements. On ne connaît aucun autre exemple d'une telle inefficacité dans les rapports prédateur-proie. Dans la nature, les proies fuient ou affrontent les prédateurs aussi longtemps qu'elles le peuvent. En revanche, les moutons qui ont été soumis à une sélection artificielle par l'*Homo sapiens*, grand maître de la domestication animale, sont pratiquement sans défense face aux prédateurs.

Certes, les coyotes tuent parfois quelques moutons ou d'autres animaux domestiques (ils s'attaquent même quelquefois aux volailles); mais d'autres facteurs occasionnent des pertes bien plus considérables parmi les élevages. Selon une étude des Services de l'agriculture dans l'état d'Idaho (au Nord-Ouest des États-Unis), les pertes occasionnées aux troupeaux de brebis et d'agneaux résulteraient d'abord de maladies dans 36 pour cent des décès, de causes diverses non clairement définies dans 30 pour cent et de l'action des prédateurs dans 34 pour cent, les coyotes n'intervenant que dans 14,3 pour cent des cas. De plus, tous les coyotes ne s'attaquent pas aux moutons. Ainsi, selon certaines études américaines concernant l'impact des prédateurs naturels sur l'élevage, aucune relation claire ne relie la dynamique des populations de coyotes et la mortalité du bétail.

Le coyote est donc victime de sa réussite. Il est pourchassé alors qu'il profite simplement de la disparition des mécanismes de défense chez les animaux soumis à une domestication à courte vue. Souhaitons qu'à l'avenir les éleveurs réapprennent au bétail à se défendre efficacement. A l'heure actuelle, l'échec des tentatives d'élimination des grands Carnivores sauvages résulte d'une méconnaissance de l'écologie des espèces prédatrices. Seules des études approfondies pourraient apporter une solution à ces problèmes.

Le coyote nous semble un sujet idéal pour ce type de recherches. Reste maintenant à savoir si ces résultats peuvent s'appliquer à d'autres populations de coyotes, à des espèces voisines et enfin aux Carnivores en général. En attendant, rendons hommage à la remarquable faculté d'adaptation des coyotes. Ce sens de l'à-propos leur permet de résister aux nombreuses pressions exercées sur leur environnement, y compris aux harcèlements des hommes et à la réduction drastique de leurs habitats naturels. ■

**How to reach
the people with
the longest shopping
list in the world.**

科学*

The People's Republic of China is buying and it's time your company introduced itself.

Our paid circulation of 25,000 includes China's emerging scientific, engineering and industrial leadership; the people who make the future happen. Rarely have advertisers been presented with such a clearly defined and potent audience.

China's shopping list includes most industrial categories: agriculture, energy, aerospace, chemicals, mining, data processing, communications, manufacturing, transportation, resource recovery and heavy machinery. China's ability and inclination to buy will accelerate. Now is the time to present your product, your people and your corporate identity.

SCIENTIFIC AMERICAN is now published in the first languages—English, Italian, Japanese, French, Spanish, German and Chinese—of half the world's population. World-wide paid circulation exceeds 1,000,000.

Where will your company be when China makes a purchase? If you want a place on the shopping list, we'll save you a place in the Chinese-language edition of SCIENTIFIC AMERICAN. For more information, contact: Richard Delano, 415 Madison Avenue, New York, NY 10017 (212) 754-0472, or Wallace Burgis, 54 Pall Mall, London SW1Y5JH, England, 011 441 839 1595/6.

***The Chinese Language Edition of Scientific American.**

**SCIENTIFIC
AMERICAN**

We reach the people who make the future happen.

Les nouvelles frontières de la recherche cancérologique

Les moyens utilisés pour lutter contre les cancers sont multipliés grâce aux progrès de la chimie thérapeutique et de la pharmacologie. Cette lutte, thérapeutique et préventive, devrait être aidée par les récentes découvertes sur les relations, relevant de l'immunité et d'autres mécanismes d'homéostasie cellulaire, entre les organismes et les cellules cancéreuses.

par Georges Mathé

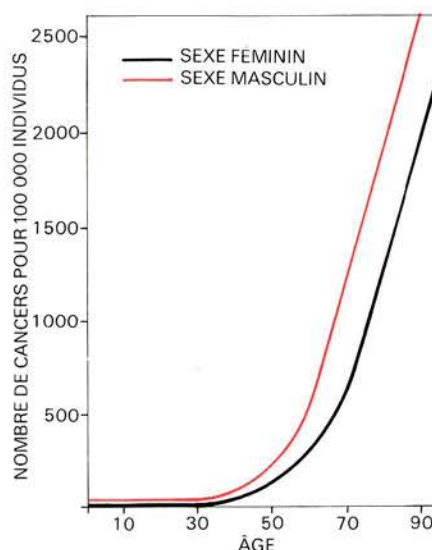
Certains médecins et chercheurs ont conclu, en revenant du dernier Congrès International du Cancer (Buenos-Aires, 1978), que les recherches sur cette maladie piétinaient. Je ne ressens pas cette impression d'immobilité : je suis fermement persuadé que les moyens aujourd'hui disponibles pour cette recherche et les approches que peuvent choisir les expérimentateurs et les cliniciens augmentent de façon explosive, tout comme les possibilités ouvertes par le développement des moyens de traitement, les progrès réalisés dans les études des causes du cancer et de l'incidence de ces connaissances nouvelles sur la prévention. Enfin, l'évolution des concepts concernant la cancérogenèse, les comportements et caractérisations des cellules tumorales, les relations de ces cellules avec les organismes qui les portent, rapprochent la maladie cancéreuse d'autres affections et permettent donc de mieux l'explorer.

Cette évolution permet d'espérer un usage plus efficace des moyens thérapeutiques actuels ainsi que la création de nouveaux moyens de traitement et de prévention, non seulement des cancers, mais aussi des autres maladies.

Les modèles, outils de la recherche

Pendant des décennies, les chercheurs ont travaillé sur des tumeurs greffées de la souris ou d'autres rongeurs et sur des tumeurs provoquées (« induites ») par des radiations, des substances chimiques ou des virus : ces modèles ont fourni nombre d'informations qui ont constitué les bases de la connaissance de la science can-

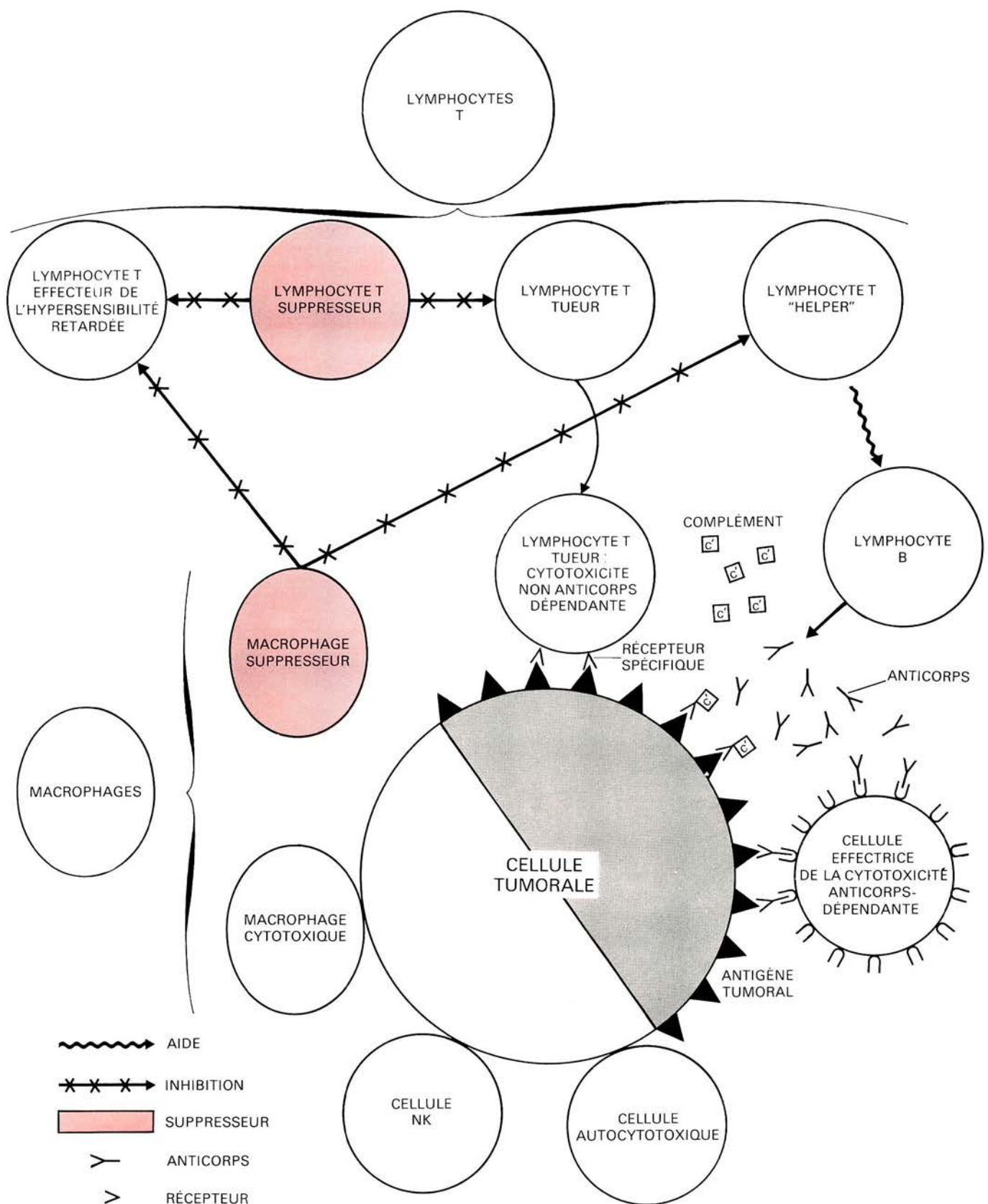
cérologique. Mais quand il doit soigner l'homme, le médecin n'est pas confronté à des cancers greffés ou induits par un virus qu'on aurait artificiellement administré au malade. Même si des tumeurs humaines naissent des irradiations ou des substances chimiques, elles ne sont que très exceptionnellement liées à des expositions similaires à celles auxquelles on soumet les animaux de laboratoire. Quant aux cancers dits « spontanés » des rongeurs ou des oiseaux, ils surviennent dans des lignées d'animaux génétiquement sélectionnées où les virus ont été artificiellement concentrés : de telles lignées n'ont pas leurs équivalents chez l'homme.



1. LA FREQUENCE DES CANCERS humains en fonction de l'âge s'élève considérablement après 50 ans. Le sexe féminin est, à tout âge, moins touché.

Sans nier ni renier les riches contributions de ces modèles classiques, on a pris conscience aujourd'hui combien leurs conditions d'induction les éloignaient de la plupart des tumeurs humaines; on a alors cherché et trouvé des cancers apparaissant dans des conditions beaucoup plus proches de celles de notre espèce. Les cancers humains surviennent, dans l'immense majorité des cas, spontanément, c'est-à-dire sans qu'on puisse accuser des facteurs radiologiques, chimiques ou biologiques, et avec une fréquence qui s'élève considérablement après 50 ans (voir la figure 1). Nous étudions, dans notre laboratoire, avec Irène Florentin et Martine Bruley, les tumeurs spontanées apparaissant chez les animaux âgés dans toutes les lignées, et nous constatons parallèlement que les résistances naturelles diminuent en fonction du vieillissement (voir la figure 3); d'autre part, un nombre de plus en plus important mais encore insuffisant de chercheurs travaillent sur les tumeurs spontanées des animaux domestiques.

En définitive, les enseignements les plus sûrs concernant les cancers humains et ce qui les déclenche ne peuvent résulter que de l'examen direct de ceux-ci. Pour ce faire, on étudie la fréquence des diverses variétés de cette maladie en fonction de la géographie, des races et des comportements. Ces études épidémiologiques ont leur importance : ainsi certains chercheurs proposent-ils de relier la réduction de la fréquence des cancers de l'estomac aux États-Unis à l'utilisation généralisée du réfrigérateur : celui-ci conserve les aliments à basse température et inhibe la prolifération des microbes donc leurs réactions chimiques qui, à la



2. LES RESISTANCES NATURELLES de notre organisme à l'égard des cellules tumorales (cancéreuses) sont de deux types. Certaines résistances sont liées aux antigènes particuliers que peuvent porter les cellules tumorales, d'autres sont indépendantes de la présence de cet antigène et peuvent donc s'exercer sur des cellules tumorales non porteuses d'antigène particulier. Les actions de reconnaissance et de toxicité des différents lymphocytes T (mis à part les réactions inflammatoires) ne s'effectuent que sur les cellules cancéreuses porteuses d'antigène; de même la production d'anticorps par les lymphocytes B et leur action toxique dépend aussi de la présence d'antigène. L'action des lymphocytes B contre les cellules cancéreuses s'effectue par l'intermédiaire d'une substance circulant dans le sang, le complément; celui-ci est amené par les anticorps produits par les

cellules B lorsqu'ils se fixent sur l'antigène tumoral. Ces anticorps fixés sur les antigènes rendent également les cellules tumorales sensibles aux cellules K, les cellules effectrices de la cytotoxicité anticorps-dépendantes. Au contraire, les macrophages, les cellules NK et les cellules autocytoxytiques peuvent exercer leur action destructrice sur des cellules cancéreuses ne portant pas d'antigène tumoral. Les réactions inflammatoires non spécifiques pour lesquelles les lymphocytes T responsables de l'hypersensibilité retardée jouent un rôle notable, exercent aussi un effet antitumoral non spécifique. Les réactions spécifiques peuvent être freinées par des cellules régulatrices ou suppressives appartenant à la population des lymphocytes T ou à celle des macrophages. Ces cellules suppressives peuvent jouer ici un rôle néfaste puisqu'elles empêchent la destruction de la cellule cancéreuse.

température de l'atmosphère, contribuent à la transformation de certains composés nitrés; ces composés nitrés peuvent être convertis par les microbes de notre estomac en nitrosamines, cancérogènes puissants.

C'est aussi sur l'homme seulement que l'utilité d'un moyen thérapeutique peut être, en dernière analyse, établie; les essais visant à établir les effets des médicaments sur l'homme sont menés selon des méthodes très rigoureuses: on respecte les règles scientifiques (les essais sont séparés en « phase I » où l'on étudie la tolérance et où l'on recherche l'efficacité, en « phase II », correspondant à l'étude de la précision de l'efficacité, et en « phase III » où l'on compare deux traitements), et les exigences de l'éthique: les malades soumis aux essais des phases I et II doivent n'avoir rien à perdre (car leurs tumeurs sont insensibles aux traitements antérieurement disponibles) et avoir quelque chose à espérer; les essais dits phase III, ou comparatifs, sont des traitements pour lesquels on n'a ni certitude, ni présomption qu'ils aient plus d'effet que l'absence de médicaments ou que l'un soit supérieur à l'autre. Ces essais sont menés parallèlement à des études de toxicologie et de pharmacologie dites clini-

ques, car c'est chez l'homme seulement que l'on peut établir le comportement d'un médicament (la discipline étudiant le destin des médicaments, la pharmacocinétique, est en pleine expansion).

Lorsque les recherches ne portent que sur la cellule cancéreuse hors de son environnement, on utilise des cultures: tandis que l'on ne cultivait, il y a quelques décennies, que de rares lignées de cellules cancéreuses tellement modifiées par les passages successifs qu'elles étaient devenues des monstres biologiques, on peut aujourd'hui cultiver les cellules de presque chaque cancer humain. De plus, tandis que le sérum du sang était, encore récemment, nécessaire au succès d'une culture, on peut aujourd'hui réussir des cultures dans des milieux entièrement artificiels, ne contenant pas de sérum; ces milieux présentent l'avantage d'être de composition strictement fixe et donc de ne pas contenir de facteurs biologiques inconnus qui pourraient agir sur ces cultures de façon mal contrôlée.

La richesse et l'intérêt des modèles dont dispose aujourd'hui le chercheur sont donc considérablement accrus. Encore faut-il qu'il ait les moyens de les comparer donc qu'il puisse en essayer plusieurs pour corréler les observations.

La recherche thérapeutique, recherche rentable

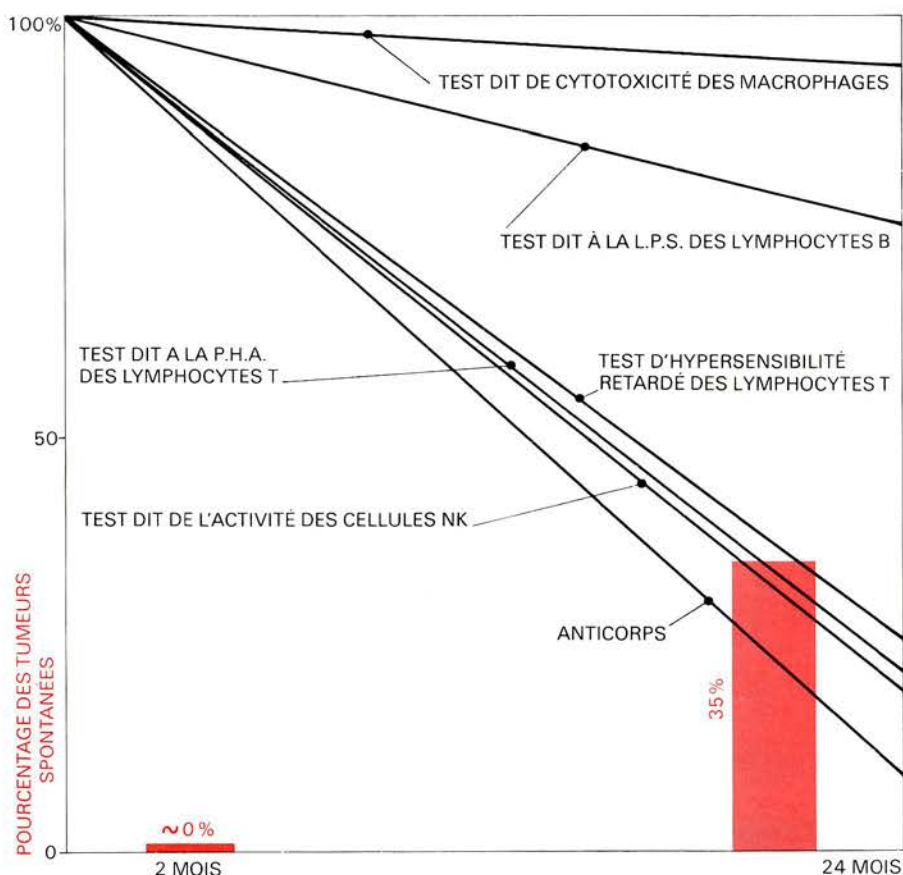
Quand une tumeur est localisée, c'est-à-dire limitée dans son extension anatomique, il existe deux méthodes thérapeutiques pour la détruire: la chirurgie et la radiothérapie. La chirurgie est l'objet de remarquables progrès, notamment liés à l'optimisation de la nutrition du patient. La radiothérapie s'est également diversifiée et perfectionnée: la physique lui permet d'ajouter aux rayons X, aux rayons gamma et aux électrons, les neutrons (plus efficaces que les rayons ou les particules précédents sur les tumeurs mal oxygénées, le plus souvent en raison de leur volume), les mésons π (applicables sur des tumeurs profondes à des doses fortes sans léser de façon rédhibitoire les tissus sains) et les ions lourds (qui, en radiothérapie, sont par exemple des ions de carbone, d'oxygène et de néon: ils combinent les avantages des neutrons et des mésons π); la chimie permet de combiner, à l'irradiation, des médicaments qui amplifient son pouvoir de tuer les cellules cancéreuses et qui portent le nom de radiosensibilisateurs.

Mais, dans 70 pour cent des cas, des cellules cancéreuses ont déjà quitté le lit de la tumeur primaire au moment du traitement local (chirurgie et/ou radiothérapie) pour se disséminer dans divers organes où elles forment des métastases.

Le cancérologue est donc amené à traiter 70 pour cent des patients, soit lorsque ces métastases sont décelées (maladie avancée), soit dès après le traitement local (maladie résiduelle post-opératoire imperceptible ou micro-métastases).

Pour cela, on a mis au point deux types de traitements qui atteignent les cellules cancéreuses dans toutes les parties du corps: la chimiothérapie qui empêche les cellules de se diviser (d'où le nom de « cytostatiques » donné à ses agents) et l'immunothérapie qui stimule les résistances naturelles à l'égard des cellules cancéreuses.

Les chercheurs en chimiothérapie découvrent chaque année de nouveaux médicaments qui s'ajoutent à la quarantaine actuellement disponible; deux ont été introduits dans la pratique spécialisée cette année: la vindésine, particulièrement utile dans certaines leucémies et maladies apparentées (lymphosarcomes) et d'intérêt certain dans le mélanome ou « tumeur noire de la peau », et le cis-platinum, qui permet de guérir des patients porteurs de certains cancers du testicule, même à l'état de métastases, cancers appartenant aux variétés qui étaient incurables jusqu'à aujourd'hui. La première drogue appartient à la famille des alcaloïdes de la pervenche et la seconde



3. CORRÉLATION entre le pourcentage des tumeurs spontanées (en rouge) apparues chez les souris âgées et la baisse de leurs résistances naturelles. Cette diminution est mesurée par différents tests. La restauration, par certains agents pharmacologiques, des résistances naturelles réduit très notablement la fréquence des tumeurs spontanées. On rapprochera enfin cette apparition à l'âge avancé de tumeurs spontanées chez des souris non prédisposées par leur génétique ni par leur contamination par des virus cancérogènes, de l'augmentation avec l'âge de la fréquence des tumeurs spontanées chez l'homme (voir figure 1).

à la famille des sels de platine qui, depuis la découverte du cis-platinum, se sont multipliés. Or, l'utilisation des médicaments de ces deux familles nous a appris, chez l'animal de laboratoire ou chez l'homme, que des tumeurs d'emblée, ou devenues insensibles à un médicament d'une famille peuvent être sensibles à un autre médicament de la même famille (de formule proche et que l'on appelle un analogue). Les mécanismes intimes des insensibilités ou résistances secondaires sont multiples et probablement liés à des changements du comportement des cellules, qui résultent de mutations ou d'adaptations progressives et peuvent concerner, soit leur membrane, soit leurs réactions chimiques à l'égard du produit.

La multiplication des analogues favorisera le développement de la chimiothérapie dans la mesure où cette absence de résistance croisée sera fréquente; nous étudions, dans la première famille, un autre alcaloïde, la navelbine, préparée par l'équipe de P. Potier à Gif-sur-Yvette et, dans la seconde, le malonate de platine. De même, dans une autre famille (celle des nitrosourées), nous étudions le RFCNU préparé par Philippe Imbach à Montpellier et la chlorozotocine de Ph. Schein à l'Université de Georgetown, chacune semblant présenter ses propres indications.

Une autre raison pour rechercher des analogues à des drogues efficaces est qu'il importe de diminuer les effets secondaires toxiques : dans une famille dite des anthracyclines, le membre le plus actif est l'adriamycine, mais ce médicament présente l'inconvénient de provoquer des chutes totales de cheveux et des lésions du cœur; or un analogue découvert au Japon, l'aclacinomycine, nous est apparu actif dans les leucémies et certaines maladies apparentées, les lymphosarcomes, sans qu'il fasse tomber les cheveux; de plus, cet analogue n'affecte le cœur qu'exceptionnellement. L'élimination de ces effets secondaires avait été prévue grâce aux études toxicologiques que nous menons systématiquement pour les composés de cette famille en étudiant leur effet au microscope optique sur les poils et, au microscope électronique, sur le cœur de hamsters particulièrement sensibles.

Il serait intellectuellement fort satisfaisant et peut-être plus efficace de trouver des molécules nouvelles, utiles en chimiothérapie, grâce à nos connaissances de la biologie de la cellule. Cette direction de recherche ne s'est révélée adéquate que dans deux cas : pour des agents qui agissent comme antagonistes de certains matériaux nécessaires à la vie de la cellule, par exemple les antagonistes d'une substance, l'acide folique, que l'on peut apparenter aux vitamines, et pour des anti-hormones qui peu-

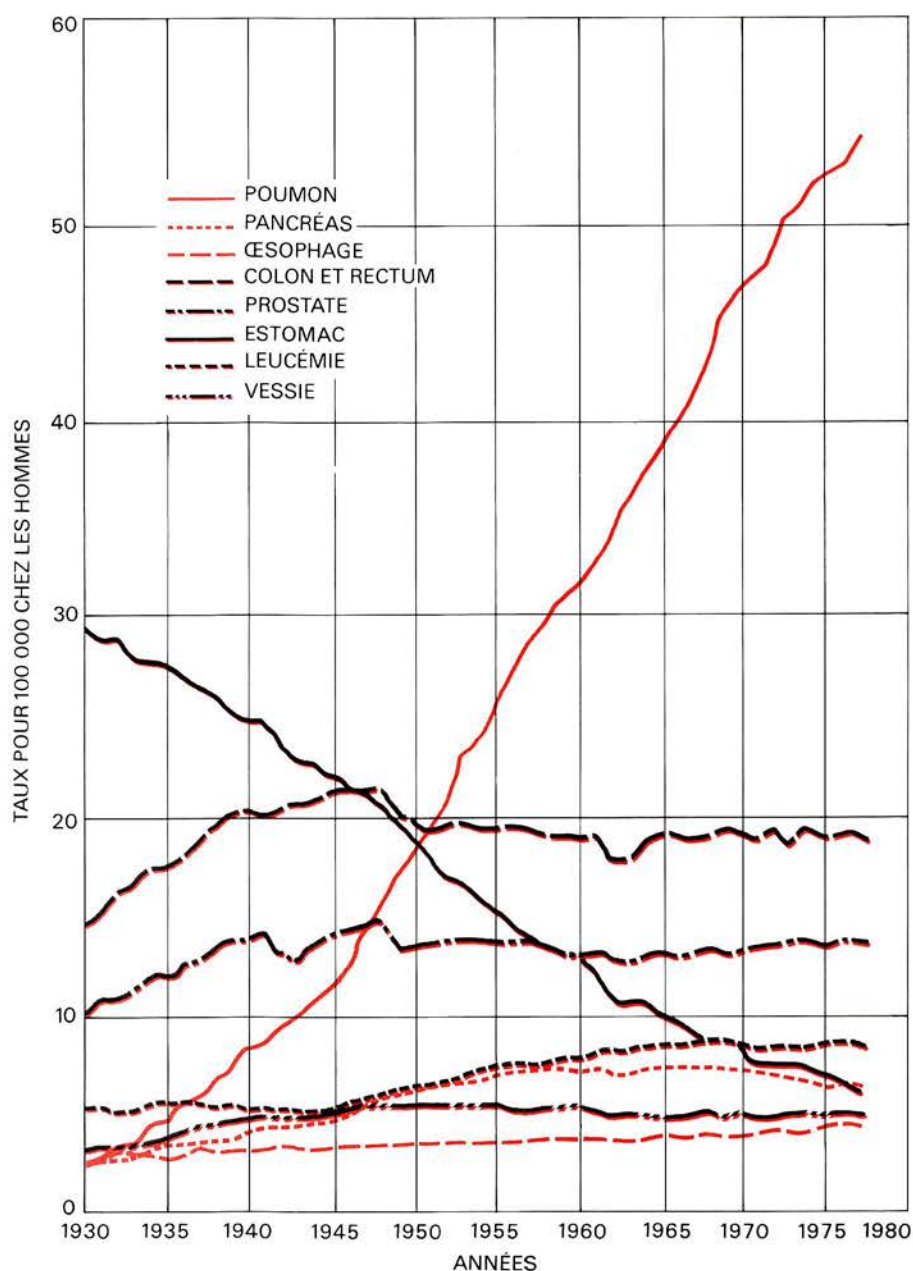
vent inhiber la production ou l'action de certaines hormones.

Hormis ces deux exceptions, la plupart des familles de drogues de la chimiothérapie des cancers ont été découvertes par hasard, au cours de recherches souvent indépendantes de l'objectif. Ainsi, en dépit de la difficulté inhérente à une telle recherche « à tâtons », on a récemment découvert l'AMSA, un dérivé de l'acridine, membre d'une famille nouvelle dont l'étude semble actuellement prometteuse.

D'autre part, nous apprenons à utiliser plus efficacement les drogues disponibles, tout comme nous avons appris à employer plus efficacement

les radiations, grâce à une meilleure connaissance de leur destin dans l'organisme (pharmacocinétique) et à une meilleure connaissance des modalités de la multiplication des cellules cancéreuses (cinétique cellulaire).

Nous savons aussi combiner radiothérapie (pour le traitement d'une tumeur locale) et chimiothérapie (pour celui des cellules déjà disséminées). On peut même tirer bénéfice de leur combinaison avec l'hyperthermie (chaleur) laquelle empêcherait notamment les réparations des lésions que provoquent ces deux moyens thérapeutiques au niveau de certains matériaux de la cellule, notamment le DNA; appliquée localement à une tempéra-



4. BAISSÉ DE LA FRÉQUENCE DU CANCER DE L'ESTOMAC comparée à l'ascension ou à la stagnation des fréquences d'autres cancers, entre 1930 et 1977 aux États-Unis. D'études statistiques de ce type, on peut essayer de déceler les variations concomitantes de certains autres paramètres et par conséquent établir, lorsque cela est possible, des relations de cause à effet; ainsi la diminution des cancers de l'estomac coïnciderait avec la généralisation de l'usage du réfrigérateur et l'on a expliqué comment la formation de certains agents cancérogènes, les nitrosamines, serait empêchée grâce à une meilleure conservation des aliments.

ture supérieure à 43 degrés, l'hyperthermie est même directement toxique pour les cellules.

L'immunothérapie a été proposée par nous, il y a 20 ans, pour éliminer les quelques cellules cancéreuses demeurant après une chimiothérapie, une radiothérapie ou une opération; l'immunothérapie amplifie les résistances naturelles de l'organisme qui, normalement capables de ne tuer qu'une dizaine de cellules, peuvent alors en tuer une centaine de milliers.

On a tenté d'amplifier ces défenses naturelles par une vaccination spécifique, soit avec des cellules tumorales mortes (un essai actuellement en cours à New York sur la leucémie myéloïde aiguë donne un remarqua-

ble résultat), soit avec l'antigène tumoral extrait chimiquement des cellules cancéreuses (un essai mené au Canada sur le cancer du poumon donne également un résultat significativement favorable).

L'immunothérapie a suscité espoir et enthousiasme, d'une part, parce que les résultats des premiers essais étaient intéressants, mais aussi parce qu'on avait expérimentalement démontré que les cellules cancéreuses portaient, à leur surface, des antigènes tumoraux, molécules chimiques que ne portent pas les cellules normales correspondantes. Or, une déception apparut lorsqu'on découvrit, d'une part que les antigènes des cellules cancéreuses pouvaient être différents dans la tumeur

primaire et dans les métastases, ce qui interdisait de n'utiliser que le matériau spécifique extrait à partir d'une seule tumeur pour fabriquer un vaccin, et d'autre part que les cellules des tumeurs spontanées pouvaient ne pas porter d'antigènes tumoraux (apparition d'un phénomène de sélection?).

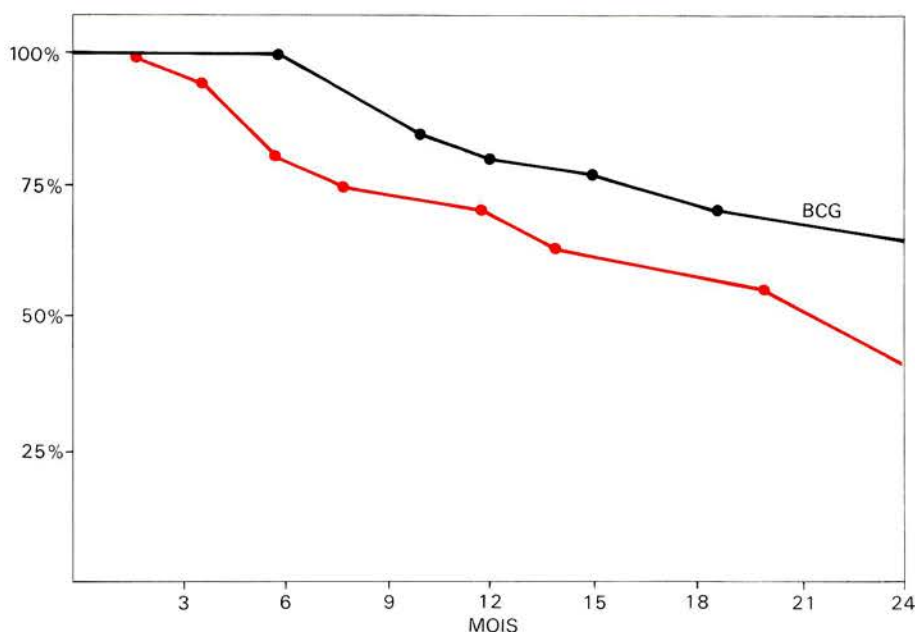
Heureusement, l'immunothérapie peut être réalisée par des moyens autres que le vaccin spécifique à base d'antigène: ces moyens sont appelés « adjuvants de l'immunité ». On objectera que, pour qu'une réaction immunitaire non spécifique se produise, il faut qu'existe un antigène que les lymphocytes T et B reconnaissent. Les lymphocytes T sont capables notamment de tuer directement les cellules porteuses de l'antigène et d'activer la coopération destructrice des monocytes (une variété de globules blancs) envers les éléments tumoraux. Les lymphocytes B peuvent produire des anticorps, lesquels rendent vulnérables les cellules cancéreuses à l'action d'une substance circulant dans le sang, le complément; de plus, l'adhérence de tels anticorps sur les cellules tumorales fait qu'elles sont également destructibles par d'autres lymphocytes dits K (de « killers »: tueurs) responsables de la cytotoxicité dite « anticorps-dépendante ».

La surveillance immunitaire

Si les cellules cancéreuses ne portent pas d'antigènes particuliers, elles ne peuvent être « immunologiquement reconnues » par des anticorps et de telles réactions ne peuvent être déclenchées. Pourtant, de tels éléments tumoraux peuvent être tués par certaines cellules, appartenant à la famille des lymphocytes ou à celle des monocytes, lesquelles agissent sans être immunisées contre un antigène: c'est ainsi qu'une famille de cellules dites NK (de « natural killers », c'est-à-dire tueurs naturels) peut détruire des cellules cancéreuses prélevées dans des cultures. Nous travaillons d'autre part avec L. Olsson et N. Kiger sur la capacité qu'ont certaines cellules d'animaux porteurs de tumeurs de tuer non seulement les cellules de leurs cancers, mais des éléments (fibroblastes) normaux: on appelle ces cellules « autocyto-toxiques »; il n'est pas démontré, mais il est probable, que ces cellules diffèrent des cellules NK; la découverte de leur fonction partiellement auto-destructrice rapproche les réactions naturelles contre les cancers des mécanismes probablement mis en jeu dans le déclenchement des maladies dites auto-immunitaires. Ainsi, il semblerait qu'il faille inclure la classique « surveillance immunitaire » dans les processus généraux assurant l'homéostasie cellulaire au sens large,



5. EFFET DU TRAITEMENT d'une métastase hépatique d'un cancer de l'appareil digestif par un nouveau médicament (analogue des nitrosourées), le RFCNU. A gauche, image scintigraphique du foie avant traitement: son volume est très important, le contour est irrégulier, et il présente de nombreuses lacunes; à droite, image scintigraphique du foie après traitement; son volume est réduit à la valeur normale et la plupart des lacunes ont disparu. Le résultat est considéré comme une régression supérieure à 50 pour cent.



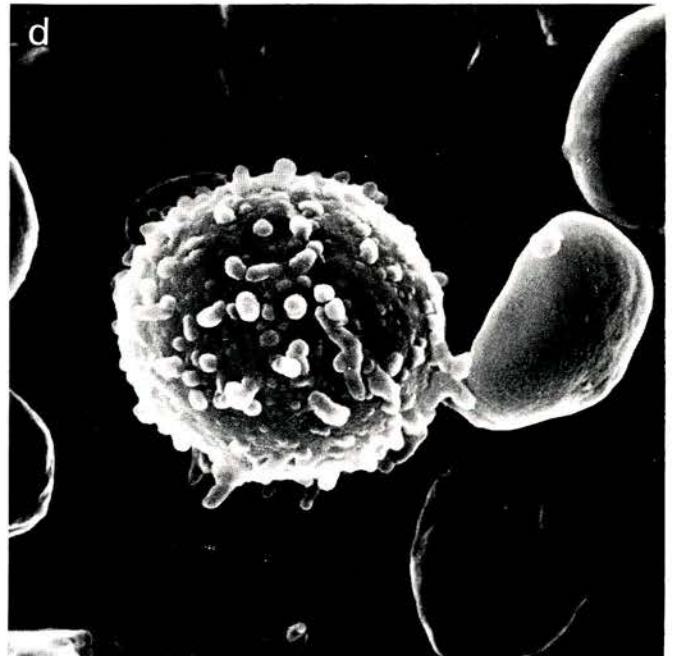
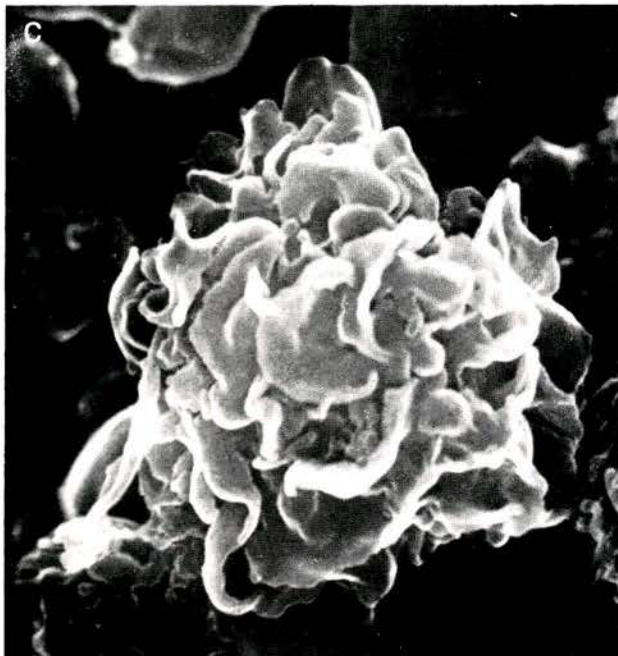
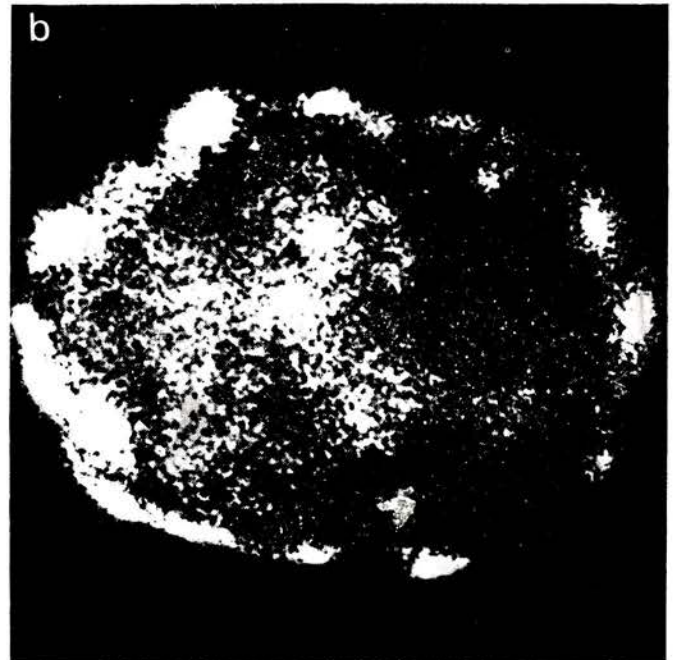
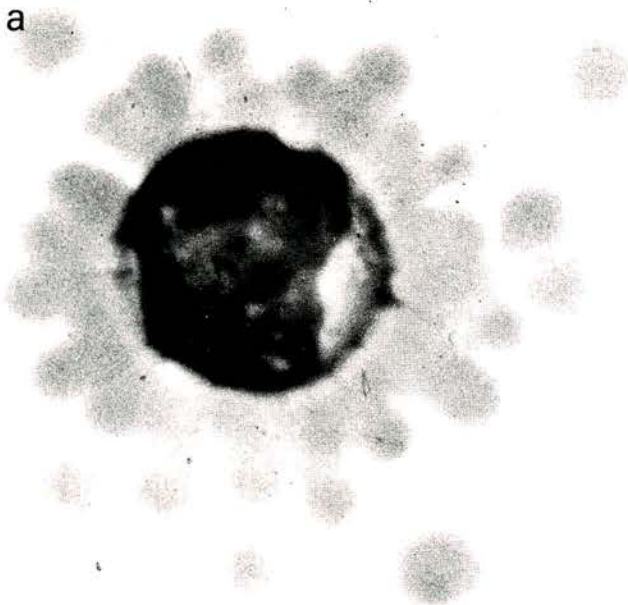
6. POURCENTAGES d'individus en parfaite santé pendant les mois qui suivent l'intervention chirurgicale pour cancer des poumons. Un premier groupe d'individus a été soumis à l'immunothérapie par le bacille Calmette-Guérin (BCG) (courbe en noir) et l'autre groupe (courbe en couleur) n'a pas été soumis à cet essai thérapeutique. Le pourcentage de rémission est plus élevé (au moment de cette évaluation) chez les malades soumis au traitement, ce qui indiquerait que le BCG serait un stimulant général des réactions immunitaires de l'organisme.

c'est-à-dire la régulation des nombres et des relations, entre elles, des diverses cellules. Les effets et peut-être le nombre de ces cellules autocyto-toxiques sont considérablement amplifiés par les agents de l'immunothérapie des cancers tels que le BCG, et ce, davantage à l'égard des cellules tumorales qu'à l'égard des cellules normales. Ainsi, l'immunothérapie dite non spécifique des cancers, appliquant des « adjuvants de l'immunité », appelle un certain investissement intellectuel. Le premier de ces adjuvants fut le BCG. Il importe de comprendre que ce microbe de la tuber-

culose bovine, vaccin spécifique de la tuberculose humaine, agit comme stimulant général de résistances naturelles dépendantes ou non dépendantes de l'antigène, donc immunitaires ou non immunitaires *stricto sensu*.

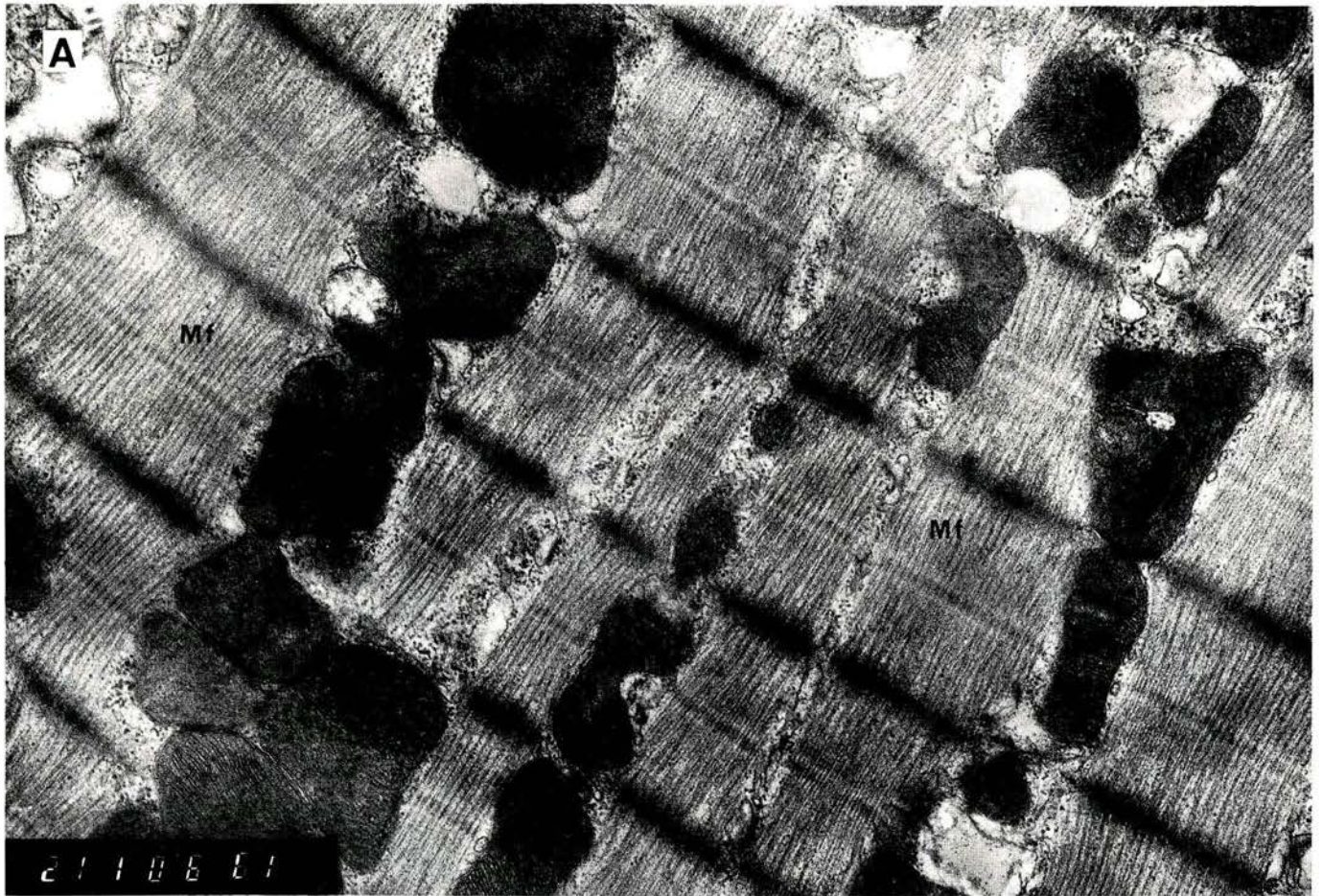
Ceci explique sans doute qu'on relève dans la littérature plus de 30 essais thérapeutiques comparatifs menés chez l'homme dans lequel l'immunothérapie (non spécifique) par des adjuvants donne des résultats significativement favorables : pour nous limiter aux essais dits randomisés (avec tirage au sort des malades), les affections qui apparaissent

aujourd'hui, à la lumière de ces essais, les plus sensibles à l'immunothérapie sont certaines leucémies aiguës, les lymphosarcomes, le cancer du poumon, le cancer du sein, le cancer de l'intestin, le mélanome (ou tumeur noire de la peau). Une question apparaît naturellement : ces résultats sont-ils dus aux effets de la thérapie sur les « mécanismes immunitaires » *large sensu* que nous avons évoqués ci-dessus ou sont-ils dus, au moins partiellement, aux phénomènes immunitaires *restricto sensu* n'affectant que les cellules cancéreuses portant des « antigènes tumoraux »?



7. DIFFERENTS TYPES DE GLOBULES BLANCS susceptibles d'attaquer les cellules cancéreuses. En a, le lymphocyte T est reconnu parce qu'il agglutine des globules rouges de mouton (microscopie optique). En b, un lymphocyte B examiné en fluorescence : on dis-

tingue à la surface les anticorps qu'il sécrète; ils sont visibles car ils ont fixé des anticorps anti-anticorps marqués par une substance fluorescente (microscopie à ultraviolet). En c, un monocyte macrophage comparé à un lymphocyte en d (microscopie électronique).



Si on peut donc expliquer (probablement d'ailleurs ni exactement, ni complètement) le succès de certaines immunothérapies, il faut aussi tenter de comprendre les échecs d'autres essais. On a déjà mis en cause l'absence d'antigènes tumoraux; on évoque aussi des « sanctuaires anatomiques » aussi différents que le cerveau et les testicules, dans lesquels les cellules tumorales ne seraient pas découvertes par les lymphocytes. Une autre explication plus intéressante fait intervenir des cellules de la machinerie immunitaire dites cellules « suppressives » car elles peuvent bloquer la réaction des cellules tueuses d'éléments cancéreux, ou « régulatrices » car elles n'interviennent que lorsque ces cellules tueuses s'emballent (elles gênent l'immunothérapeute du cancer, mais elles pourraient jouer un rôle préventif et thérapeutique des maladies auto-immunitaires, dans la mesure où l'on saurait les stimuler).

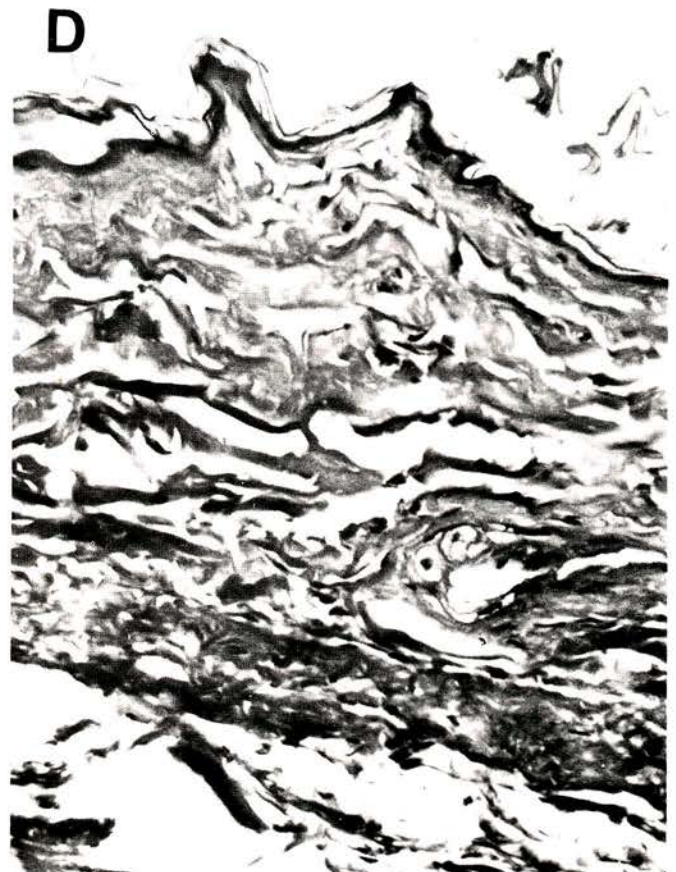
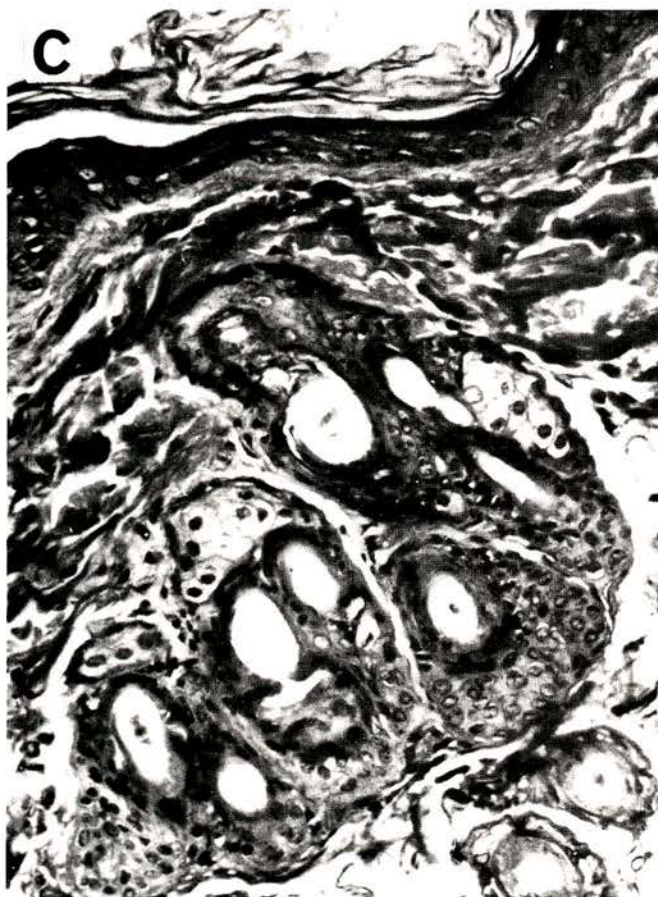
Or, malheureusement pour le cancérologue, les adjuvants classiques de l'immunité utilisés dans les premiers

essais d'immunothérapie des tumeurs, notamment le BCG et *Corynebacterium parvum*, stimulent, dans certaines conditions, ces cellules suppressives, par exemple lorsque la dose de BCG portée par l'organisme est supérieure à une dose optimale. Or, comme le BCG est un microbe vivant qui se multiplie dans l'organisme, il est difficile d'en contrôler la concentration et l'évolution de celle-ci. Pour résoudre cette difficulté, nous avons recherché, avec plusieurs chimistes de laboratoires publics et de firmes pharmaceutiques internationales, des adjuvants qui soient des molécules simples: de cette étude sont nés plusieurs agents activant les cellules tueuses et peu ou pas les cellules suppressives; ces nouveaux agents ne sont actifs que sur une ou deux populations de cellules, rarement sur toutes comme le BCG: c'est ainsi que l'azimexon est surtout un stimulant des lymphocytes T et des macrophages; la tuftsine, un stimulant des lymphocytes B et des macrophages et le glucan, un stimulant des macrophages. Il nous faut

aujourd'hui apprendre à combiner ces agents pour détruire le plus efficacement les éléments tumoraux.

Cette même étude nous a amenés à distinguer les stimulants des cellules tueuses des animaux non immunodéprimés et les restaurateurs des états de déficience immunitaire: la thymosine d'Alain Goldstein, le levamisole et surtout la bestatine d'Umezawa (chercheur à l'Université de Tokyo), nous permettent en effet d'identifier ces agents restaurateurs. Les deux derniers médicaments ramènent à la normale les résistances naturelles de souris âgées déprimées par le vieillissement et, par conséquent, diminuent significativement, comme nous l'avons observé avec Martine Bruley, la fréquence des tumeurs qui apparaissent en liaison avec l'âge avancé. Le premier essai d'immunorestauration, par la bestatine, d'humains immunodéprimés est encourageant.

Nous avons pédagogiquement distingué chimiothérapie et immunothérapie, mais nous savons, avec le poète Léon Paul Fargue, « qu'il n'est point de simplicité; seules existent les



8. L'ACLACINOMYCINE (ACM) EST UN ANALOGUE DE L'ADRIAMYCINE (ADM), ces deux médicaments appartenant à la famille des anthracyclines. Or, l'aclacinomycine, aussi efficace que l'ADM contre certaines cellules tumorales, est beaucoup moins toxique pour le cœur, la peau et les poils. Sur la photographie A d'un myocarde de hamster doré traité avec une dose antitumorale optimale d'ACM, les mitochondries (M) et les myofilaments (Mf) sont structurellement intacts après sept jours de traitement. Sur la photographie B de myocarde de hamster doré au septième jour de traitement par l'ADM, on observe un gonflement des mitochondries (M) avec éclaircissement

de leurs matrices et destruction des crêtes (raies noires allongées), une formation de figures myéliniques (AM) et une tendance à la destruction des myofilaments (Mf) (photographies en microscopie électronique). La peau de hamster doré (photographie C) après quatre semaines de traitement à l'aclacinomycine à la dose antitumorale optimale, présente une structure normale des couches cellulaires de l'épiderme et des poils. Au contraire, chez un hamster doré après trois semaines de traitement à l'adriamycine (ADM) à la dose optimale, il y a atrophie des couches cellulaires de l'épiderme et perte des poils (photographie D). Ces dernières photographies sont prises au microscope optique.

simplifications ». De nouveaux agents tels que l'interféron, substance secrétée par nos cellules lorsqu'elles sont agressées par des virus, le facteur nécrosant les tumeurs, que l'on fait produire par l'organisme en lui administrant successivement du BCG et une toxine microbienne, et les rétinoides, famille de substances chimiques apparentées à la vitamine A, forment un pont entre la chimiothérapie et l'immunothérapie : ils stimulent certaines résistances naturelles et sont aussi directement toxiques pour les cellules tumorales. Il est enfin un autre groupe d'agents capables de reconvertir des cellules tumorales en cellules normales, ceci en les différenciant, c'est-à-dire en les faisant évoluer, mûrir, de telle sorte qu'elles retrouvent les fonctions qu'exercent leurs analogues normaux.

Le lecteur sera surpris d'apprendre que cette recherche thérapeutique, si riche en nouveaux moyens, est souvent freinée, voire bloquée dans son développement par la difficulté technique de produire les quantités nécessairement importantes pour les essais chez l'homme : le domaine le plus critique à cet égard est celui des agents de production biologique, par exemple l'interféron. On attend beaucoup des méthodes de cultures en masse de cellules productrices, et des manipulations génétiques qui réaliseront de nouveaux esclaves bactériens producteurs d'interféron humain.

Tactique et stratégie

Le cancérologue médical conduit aussi des études, surtout cliniques

(essais thérapeutiques), pour employer chacun des moyens avec le maximum d'efficacité (tactique) et pour apprendre à les combiner de la meilleure façon possible (stratégie).

Un des exemples les plus remarquables du progrès tactique est l'inclusion de substances chimiothérapiques ou immunothérapiques dans les liposomes (ou microboules de graisses) dont sont particulièrement avides certaines cellules cancéreuses (chimiothérapie) et les macrophages (immunothérapie).

L'exemple le plus frappant du progrès stratégique réside dans l'attaque, par la chimiothérapie et/ou l'immunothérapie, des quelques cellules qui ont déjà quitté la tumeur primaire quand le chirurgien l'opère ou que le radiothérapeute la détruit localement ; ces cellules engendrent la « maladie résiduelle imperceptible » responsable de l'apparition, plusieurs mois ou années après le traitement local, des rechutes sous forme de métastases dans la majorité des cas (70 pour cent). Le bénéfice apporté par la chimiothérapie appliquée aussitôt après l'opération est de 40 pour cent dans le cas de diverses tumeurs des os et du cancer du sein, et il sera probablement plus important dans celui des cancers du testicule ; appliquée après la radiothérapie dans la maladie de Hodgkin localisée, la chimiothérapie élève aussi notablement les taux de guérison.

Les combinaisons de récents traitements médicaux permettent de guérir huit tumeurs à l'état métastasé et disséminé, incurables il y a 20 ans : la leucémie aiguë lymphoïde, certains lymphosarcomes, la maladie de

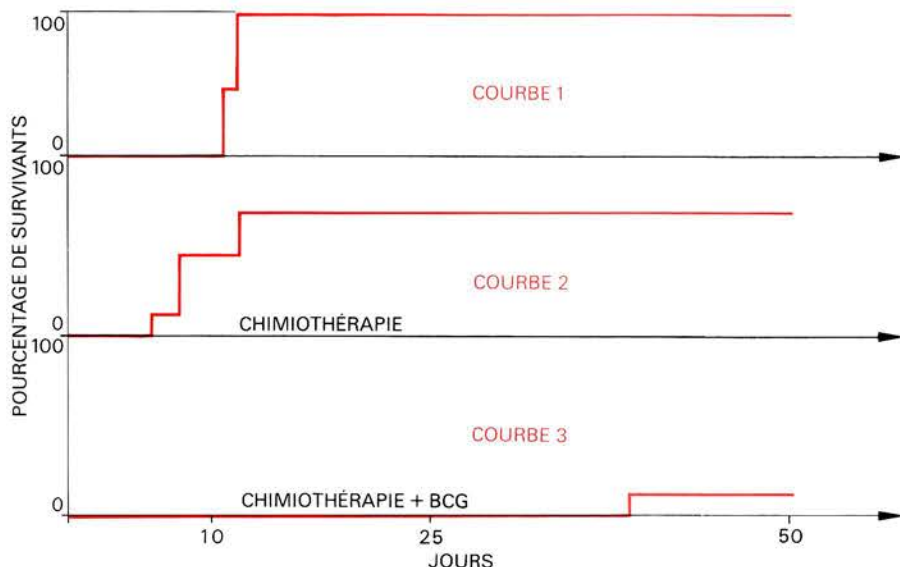
Hodgkin, la tumeur du rein dite de Wilms, certains sarcomes embryonnaires, certains cancers du placenta, certains cancers du testicule et peut-être certains cancers du poumon dits à petites cellules. On a ainsi pu réduire de 40 pour cent en 20 ans la mortalité des enfants due au cancer.

L'ambition suprême, la prévention

Le médecin peut non seulement guérir des patients cancéreux jadis incurables, mais conseiller efficacement chacun pour qu'il adopte des comportements de vie capables de réduire notablement son risque de porter un jour un cancer, notamment, celui du col de l'utérus, de la peau et, surtout, celui du poumon et de la gorge. Si le médecin peut donner de tels conseils, c'est grâce aux connaissances acquises par l'épidémiologie, particulièrement pour ce qui concerne les corrélations entre les fréquences des différents cancers et les divers modes de vie. Toutefois, les hommes écoutent rarement et peu ces conseils : ce qu'ils demandent au médecin, c'est d'éliminer le fléau cancer de la condition humaine, comme ils demandent aux politiques d'éliminer l'inégalité.

Il faut d'abord rappeler ici que, si l'on ne guérit actuellement qu'un cancéreux sur trois, c'est parce que les humains ne se soumettent pas au dépistage systématique des tumeurs qui pourrait, à lui seul, élever ce taux de guérison à un cas sur deux, car il est efficace dans le cas des cancers du col de l'utérus, du sein, de la peau, de la gorge et même du poumon. Ce dépistage devrait, bien sûr, être particulièrement conseillé dans les populations à haut risque, par exemple chez les fumeurs. Nous mettons en œuvre actuellement un programme où nous tentons de prendre en charge les fumeurs qui ont résisté aux campagnes d'information en leur pardonnant d'être dépendants de l'accoutumance à la nicotine, ce « médicament » qui leur permet de supporter leur condition humaine. Nous tentons non seulement de détecter les cancers de la bouche, du poumon (bronches) et de la vessie à une période de leur évolution où ils sont potentiellement curables, mais de déceler les anomalies éventuellement précancéreuses pour les soumettre à un essai de prévention pharmacologique par prise de médicaments.

On a en effet découvert, au laboratoire, des agents dits « anticancérogènes » capables d'éviter l'apparition de tumeurs provoquées par l'injection d'un agent cancérogène et la transformation en cancers, d'anomalies précancéreuses, souvent produites dans un premier temps par ces mêmes substances : nous tentons de soumet-



9. LES EFFETS DU BCG en tant qu'adjuvant de l'immunité, apparaissent clairement sur ces courbes où l'on a représenté les pourcentages de survie en fonction du temps. Au temps zéro, on a greffé 1 000 cellules d'une leucémie à chaque souris. La courbe 1 représente la courbe de mortalité en l'absence de traitement. La courbe 2 est la courbe de mortalité des souris que l'on a traitées un jour après la greffe avec un médicament chimiothérapique, la cyclophosphamide, à la dose de 403 milligrammes par kilogramme ; la courbe 3 est la même courbe pour des souris soumises à la même chimiothérapie puis, au sixième jour après la greffe, à une immunothérapie par le BCG. Plus de 80 pour cent des souris sont guéries.

tre des fumeurs présentant de telles anomalies au traitement par ce type de médicaments.

Mais le tabac n'est pas le seul facteur cancérigène connu : l'alcool, la consommation de certains aliments, la simple suralimentation (notamment en graisses), l'exposition au soleil (qui nous envoie des rayons ultraviolets dangereux pour la peau) et le manque d'hygiène sexuelle sont aussi des facteurs importants.

Les supprimer tous reviendrait à nous transformer en Mormons : la fréquence des cancers est, chez eux, très basse, mais qui accepterait cette conversion ? Puisqu'elle s'avère impossible, il faut apprendre à mieux connaître les facteurs et les mécanismes de la cancérisation et peut être pourrions-nous alors agir sur eux.

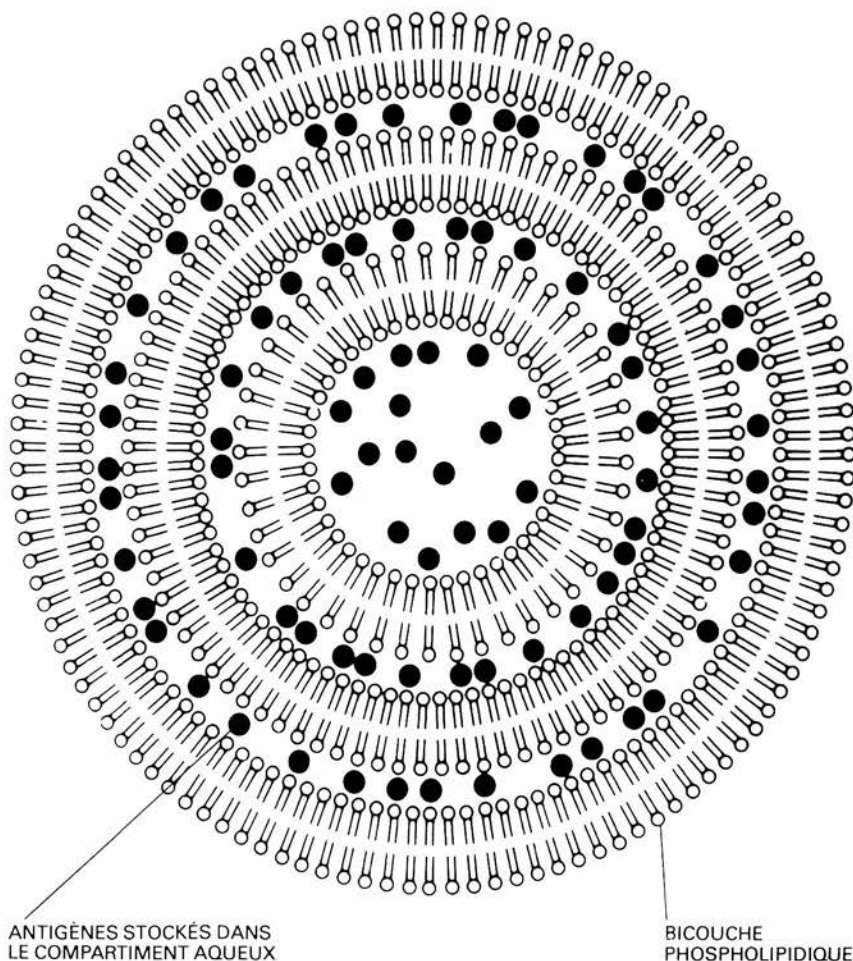
Plus on avance dans l'étude de la cancérogenèse, plus notre conception de la naissance de la maladie évolue et fait apparaître des notions nouvelles : il y a encore peu de temps, on étudiait à part la cancérogenèse par les radiations qui fractionnaient l'ADN, la cancérogenèse par les substances chimiques qui étaient supposées affecter l'ADN d'une manière caractéristique de leurs structures, et la cancérogenèse par les virus dont la constitution leur permettait de s'intégrer ou d'intégrer, dans l'ADN, leur copie.

On a poursuivi des recherches tentant de mieux comprendre les mécanismes et facteurs propres à chacun de ces trois types d'agents inducteurs du temps premier de la cancérogenèse, la conversion d'une cellule normale en cellule « transformée », celle-ci donnant une famille de cellules identiques à la cellule mère. Cette dernière caractéristique a fait qualifier de « monoclonales » (ne provenant que d'un seul ancêtre) les populations cellulaires de la plupart des cancers. On a depuis, découvert des tumeurs secondairement ou d'emblée polyclonales.

On a appelé « promotion » l'ensemble des processus qui favorisent la prolifération de ce ou de ces clones et l'on a démontré la grande diversité de ce phénomène.

L'Homme n'étant pas exposé, en dehors de cas exceptionnels, à des doses d'irradiation de l'ordre de celles utilisées chez l'animal de laboratoire, on s'est attaché à l'étude de l'effet cancérogène des très faibles doses dont le rôle, s'il est probable, ne peut être qu'infime.

On n'a mis en évidence dans notre espèce qu'un seul virus, dit Epstein-Barr, appartenant à la famille des virus Herpès (à ADN), qui puisse être soupçonné d'être à l'origine de deux tumeurs, le lymphome de Burkitt (ne survenant guère qu'en Afrique centrale) et certains cancers de la gorge observés dans certaines régions dont la Chine; on n'a cependant pas renoncé à rechercher des



10. DANS LES LIPOSOMES ou microboules de corps gras, on peut inclure des médicaments anticancéreux. L'insertion d'agents anticancéreux dans les liposomes augmente l'efficacité de ces agents car ceux-ci sont véhiculés plus facilement et plus efficacement jusqu'aux cellules cancéreuses. De tels liposomes peuvent également transporter, préférentiellement aux macrophages, des adjuvants de l'immunité ou des antigènes tumoraux (cas de cette figure). Les macrophages et les cellules cancéreuses sont particulièrement avides des liposomes.

virus à ARN (responsables, dans plusieurs espèces animales, de leucémies, de sarcomes et de cancers mammaires), mais l'on n'a trouvé, dans le cas des tumeurs humaines, que des indices convainquant insuffisamment de leur présence.

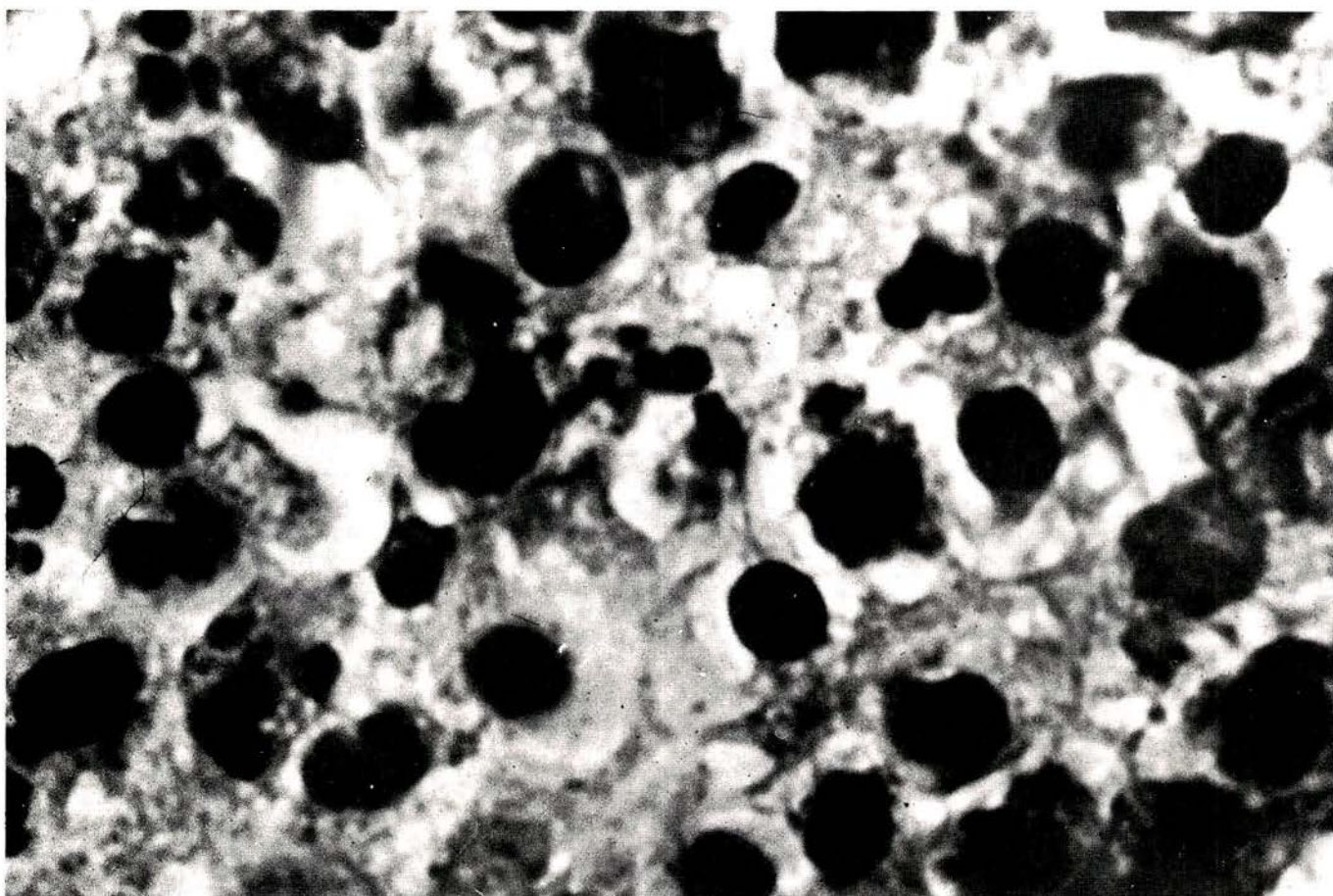
En ce qui concerne les substances chimiques, on sait aujourd'hui que ce n'est souvent pas l'agent cancérogène accusé légalement qui agit (par exemple les nitrates), mais des dérivés fabriqués par l'organisme (par exemple les nitrosamines); l'étude de ces modifications ou métabolismes des cancérogènes chimiques est l'objet d'un important développement.

A noter que, si les études concernant l'homme ne permettent pas d'attribuer un rôle notable aux radiations et n'ont récolté qu'un seul virus qui n'est d'ailleurs accusable que pour deux cancers seulement, les études épidémiologiques, qui amènent à considérer que 80 pour cent des cancers humains pourraient être liés aux environnements et aux comportements, tendent à attribuer un rôle plus important aux cancérogènes chimiques; il faut également indiquer

que les agents utilisés au laboratoire pour réaliser la promotion d'une tumeur sont le plus souvent des agents chimiques. Mais, malgré cette importance attribuée aujourd'hui aux cancérogènes de ce type, on est loin de connaître, pour un agent complexe comme le tabac, ce qui joue un rôle de promotion et ce qui joue un rôle de transformation.

En fait, on tend de moins en moins à rechercher des mécanismes de la transformation qui soient distincts pour les trois types de cancérogenèse. Dans les trois cas, l'ADN est affecté et tout ce qui perturbe ses possibilités de réparation (laquelle est spontanée et permanente) modifie la fréquence de la transformation.

Ainsi les mécanismes fondamentaux de la transformation par les radiations, les substances chimiques et les virus pourraient être assez semblables; ces déclencheurs pourraient tous agir en induisant ou en favorisant l'installation d'une anomalie de la régulation génétique de la cellule, par exemple en perturbant les gènes qui interviennent dans le développement de la différenciation (maturation);



11. L'EFFET DU FACTEUR NÉCROSANT les tumeurs apparaît clairement sur la photographie du bas. En haut : aspect des cellules tumorales sur lesquelles on va tester la présence de facteur nécrosant

les tumeurs. En bas : aspect des cellules tumorales après l'injection à l'animal qui les porte de facteur nécrosant les tumeurs; les noyaux sont contractés et les cellules ont tendance à être détruites.

les spécialistes pensent que l'équilibre entre transformation et différenciation cellulaires est un des sujets d'étude méritant une urgente priorité puisque les cellules cancéreuses sont fréquemment (mais pas toujours) indifférenciées. On s'efforce actuellement de découvrir et de caractériser les produits d'expression de ces gènes de différenciation (par exemple des protéines de la surface cellulaire), produits qui permettraient de connaître leur état de fonctionnement et pourraient guider les tentatives pour arrêter ce fonctionnement, s'il est responsable de la transformation. Il va de soi que ces études seront accélérées par les technologies nouvelles concernant les intégrations génétiques, le clonage viral, etc.

Apparaissent également fondamentales les relations entre antigènes d'histo-compatibilité (ou antigènes qui assurent la singularité de chacun d'entre nous au niveau de ses tissus et empêchent les greffes d'individus à individus non compatibles) et antigènes tumoraux, l'expression des seconds dépendant des premiers.

Nous avons évoqué plus haut le rôle des antigènes tumoraux (AT); on crut d'abord que les antigènes des cancers provoqués par des virus étaient spécifiques des virus et ceux des cancers provoqués par les « cancérogènes chimiques », spécifiques de chaque tumeur, même quand on avait induit deux tumeurs chez un individu. Après une certaine euphorie chez les chercheurs, on a assisté à une assez grande confusion résultant du phénomène très important de l'hétérogénéité des tumeurs, puis à un véritable pessimisme lié à l'absence possible (à la lumière de la technologie d'aujourd'hui) d'antigènes tumoraux sur des cellules de cancers spontanés et à la conclusion selon laquelle certains « antigènes tumoraux » ne seraient que des antigènes de différenciation.

Actuellement on croit à nouveau à la spécificité de certains antigènes tumoraux et que d'autres antigènes ne seraient que des antigènes d'histocompatibilité erronés. Quant à leurs relations avec les antigènes de différenciation et d'autres antigènes normaux, elles se clarifient grâce au développement d'une récente technologie permettant de faire produire des anticorps monoclonaux donc extrêmement spécifiques, par des hybridomes, familles éternelles résultant d'un mariage d'un lymphocyte normal immunisé contre l'antigène et d'une cellule cancéreuse (qui lui confère cette éternité) : ils fournissent les anticorps dits monoclonaux, donc très hautement spécifiques, contre cet antigène et sont éternels comme les cellules cancéreuses.

Je donnerai deux exemples rattachés au domaine des antigènes tumoraux, pour montrer leurs intérêts : Greaves a d'abord découvert, avec un sérum de lapin, un antigène dit

par lui « leucémique » sur les cellules de la leucémie lymphoïde aiguë; ce même chercheur, ayant trouvé le même antigène sur quelques cellules souches de la moelle osseuse normale produisant le sang, le considéra comme un antigène de différenciation : or, Schlossmann a montré récemment, en utilisant un anticorps monoclonal, que cet antigène était bien un antigène leucémique de poids moléculaire 100 000 et que Greaves avait donc mis en évidence, avec son sérum plurispécifique, une famille d'antigènes de poids moléculaire 100 000, qui le contient mêlé à des antigènes de différenciation de même poids moléculaire : un tel anticorps monoclonal permet donc la distinction, dans l'ensemble des antigènes de Greaves, de l'antigène leucémique et de l'antigène (ou des antigènes) de différenciation. Il va de soi que ces antigènes sont extraits, purifiés et analysés chimiquement et que, parallèlement, on étudie la topologie de la membrane des cellules cancéreuses.

La disponibilité d'anticorps hautement spécifiques produits par les hybridomes permet d'autre part de caractériser les cellules de la machinerie immunitaire responsable des résistances des organismes; on peut, en utilisant les mêmes techniques, caractériser les cellules des tumeurs lymphoïdes et donc mieux adapter leur traitement en fonction des divers types identifiés : c'est ainsi que ces anticorps monoclonaux ont récemment permis à J. Bréard et Schlossmann de montrer que certaines cellules considérées comme lymphocytes étaient en fait des monocytes.

A noter enfin que ces hybridomes permettent de relancer, avec une efficacité très amplifiée, les classiques immunothérapies passives (fondées sur l'application d'anticorps) et adoptives (qui consistent en l'administration de cellules immunitaires réagissant contre les cellules tumorales), deux types d'immunothérapie que nous avions tentés il y a 20 ans, mais dont les essais se heurtaient aux complications liées à la non-spécificité des anticorps ou des réactions cellulaires.

Le bouleversement des concepts

On a vu l'évolution importante des concepts scientifiques concernant la cancérogenèse et la pharmacologie des cancers : on ne recherche plus un rôle cancérogène direct des virus, mais leurs effets sur les gènes de la cellule; on ne distingue plus aussi nettement les cancérogenèses virale, chimique et radiologique, mais on étudie leurs actions communes et complémentaires qui diffèrent moins entre elles qu'on ne le pensait il y a encore quelques années. On donne une place de plus en plus importante au processus de la différenciation :

j'ai mentionné la balance entre transformation et différenciation, les antigènes de différenciation et les tentatives pour différencier pharmacologiquement les cellules tumorales.

On revient à une biologie cellulaire globale et l'on observe que la cellule cancéreuse est un excellent modèle d'étude de la physiologie de la cellule, non seulement pour divers processus déjà évoqués de cinétique cellulaire, de différenciation, de reconnaissance, mais aussi pour le transport de l'information (pour laquelle certains virus classés comme cancérogènes pourraient jouer un rôle physiologique important) et pour l'homéostasie. Je ne citerai, pour illustrer cette notion générale, qu'un exemple : la fréquence de la leucémie spontanée de la souris est réduite par l'ablation du thymus; or on a longtemps pensé que les lymphocytes du thymus étaient la cible du virus de la leucémie. On peut supposer aujourd'hui que la thymectomie agit plutôt (au moins partiellement) en réduisant considérablement le nombre des cellules suppressives des résistances immunitaires qui se trouvent être dans certaines populations de ces lymphocytes thymiques.

L'étude des tumeurs des lymphocytes nous instruit sur leur diversité, leurs marqueurs et même leurs fonctions. De même, l'étude de la résistance des organismes à l'égard des cellules tumorales nous instruit sur ses moyens de contrôle des cellules caractérisées par d'autres phénotypes anormaux mais non cancéreux et, du même coup, sur les mécanismes des maladies auto-immunitaires dont certains moyens thérapeutiques utilisés aujourd'hui ne sont rien d'autre que des agents anticancéreux; pour le traitement de ces affections, on s'efforce de stimuler les cellules dites suppressives, stimulation qu'on apprend à éviter dans l'immunopharmacologie du cancer.

C'est souligner l'intérêt de la recherche cancérologique et préciser le fait qu'elle n'est pas isolée. J'ai montré qu'elle se confond avec la biologie cellulaire et la physiologie de l'homéostasie. Sa pharmacologie enrichit les thérapeutiques d'autres affections que les cancers.

Il convient donc de promouvoir la recherche contre le cancer car cette maladie est un fléau humain et économique et la recherche est payante pour deux raisons : la première raison a été émise par de Vita qui a calculé que les taxes payées par les cancéreux survivant grâce aux découvertes faites ces 20 dernières années, dépassent le budget de la gigantesque action « Conquête du Cancer » menée aux États-Unis; la seconde est que la cellule cancéreuse et ses relations avec l'organisme représentent un des modèles les plus précieux de l'étude de la biologie et de la pathologie générales. ■

Les verres métalliques

Bien que leur composition soit celle d'un métal, leur structure atomique non cristalline est celle du verre. On peut fabriquer de tels matériaux en refroidissant un alliage en fusion à une vitesse d'un million de degrés par seconde.

par Praveen Chaudhari, Bill Giessen et David Turnbull

Un verre est un solide dont la structure atomique ressemble à une photographie instantanée d'un liquide. Généralement, lorsqu'un liquide gèle, les atomes ou les molécules n'arrêtent leur mouvement qu'après avoir pris des positions ordonnées : ils forment alors un cristal. Il en résulte que les positions des atomes dans le solide sont très différentes de ce qu'elles étaient dans le liquide et, pendant la solidification, de nombreux réarrangements ont lieu. Au contraire, lors de la formation d'un verre, les atomes du liquide restent à peu près à la même place. Ainsi, ce n'est pas seulement la substance qui est gelée dans un verre, c'est aussi la configuration même des atomes. A la différence du solide cristallin, le verre ne présente aucun ordre à longue distance; on dit qu'il est amorphe.

Les verres habituels sont des silicates, c'est-à-dire des composés de silicium et d'oxygène. On a longtemps pensé que la plupart des autres substances, et en particulier les métaux, ne pouvaient pas se solidifier dans l'état vitreux, mais devaient toujours acquérir une structure cristalline. Il existe aujourd'hui de nombreuses preuves du contraire, puisque plusieurs dizaines d'alliages métalliques ont été vitrifiés. Au premier abord, ils ressemblent assez peu aux verres ordinaires; ainsi la plupart d'entre eux ne sont pas fragiles et ils ne sont pas transparents à la lumière visible. Par leur structure microscopique, ils sont pourtant sans aucun doute amorphes. Au-delà de quelques distances interatomiques, il n'y a aucune régularité et aucune périodicité dans la position des atomes; la description mathématique d'une structure si désordonnée est ardue et constitue un domaine de recherche actif particulièrement important pour l'étude des nouveaux matériaux.

Si les verres métalliques ressemblent peu aux verres silicatés, ils diffèrent aussi beaucoup des métaux cristallins. Quelques-uns des alliages métalliques vitreux ont des propriétés chimiques ou mécaniques caractéristiques, telle qu'une bonne résistance à

la corrosion et une résistance mécanique élevée, associées à une bonne ductilité. Leurs propriétés électriques et magnétiques, pleines d'intérêt, sont susceptibles d'applications. Ainsi, certains alliages peuvent renfermer des « bulles » magnétiques, ces domaines isolés de magnétisation inverse qui permettent de stocker des informations dans les mémoires d'ordinateurs. Une autre application possible concerne le noyau magnétique d'un transformateur, actuellement constitué de fer doux magnétique en phase cristalline; l'utilisation d'un verre métallique pourrait réduire les pertes d'énergie dues à l'inversion continue du champ magnétique dans ce noyau.

La fabrication des verres métalliques

L'expérience a montré que pour tout solide, il existe toujours au moins une phase cristalline plus stable que l'état vitreux. En d'autres termes, la forme cristalline est thermodynamiquement favorisée (on dit qu'elle a une énergie libre plus basse) et tout verre aura ainsi tendance à cristalliser spontanément; ceci s'applique même aux verres silicatés, bien qu'à la température ambiante, leur vitesse de cristallisation soit quasi nulle. Si les verres silicatés cristallisent si lentement, c'est parce que leurs atomes sont reliés par un ensemble de liaisons chimiques covalentes, chaque liaison étant dirigée d'un atome à un autre. Pour que les atomes se réarrangent en un réseau cristallin, un grand nombre de liaisons doivent être brisées et rétablies dans une autre configuration. Ainsi, bien que l'énergie libre du cristal soit finalement inférieure à celle du verre, il faut un apport substantiel d'énergie pour que la transition se fasse.

Les liaisons chimiques des atomes dans un métal sont plus diffuses que celles des silicates ou des matériaux isolants analogues. Les liaisons individuelles ne relient pas seulement deux atomes voisins; au contraire, le solide doit sa cohésion à l'interaction mutuelle de nombreux ions positifs

et de nombreux électrons de charge négative. Cette moins grande directivité des liaisons dans le métal fait qu'on peut retransformer un verre métallique en une structure cristalline, avec un apport plus petit d'énergie que dans le cas des verres silicatés; c'est pour cette raison qu'il semblait impossible de solidifier un métal en un état amorphe.

Pour vitrifier un matériau, on doit le refroidir à une température inférieure à un certain seuil, appelé température de vitrification, qui diffère d'une substance à l'autre. Au-dessus de cette température, les atomes sont, dans la phase liquide refroidie, libres d'effectuer des déplacements importants; au-dessous de cette température, ils sont immobilisés, mis à part des déplacements vibratoires autour de leurs positions moyennes. Ainsi, c'est seulement à la température de vitrification que la configuration atomique est gelée en une structure solide amorphe. Il apparaît par conséquent que le moyen le plus direct de fabriquer un verre est de refroidir un liquide au-dessous de sa température de vitrification.

Le problème est que la température de vitrification de toutes les substances connues est très inférieure à la température de solidification où la cristallisation commence. Pour être plus précis, la température de vitrification est inférieure à la température de solidification commençante (ou température du liquidus) où les phases liquide et cristalline de la substance peuvent coexister en équilibre. Il en résulte que lorsqu'un liquide est refroidi, il cristallise bien avant que le verre puisse se former.

La principale méthode de fabrication des verres métalliques pallie cette difficulté par une stratégie simple. Lorsqu'un liquide est refroidi au-dessous de la température du liquidus, la cristallisation ne commence pas partout à la fois; des agrégats de quelques atomes, les centres de nucléation, doivent d'abord s'assembler selon une configuration cristalline. Ces centres s'étendent ensuite par accretion jusqu'à ce que le volume entier soit solidifié. La formation

et la croissance des centres de nucléation requièrent un certain temps. La stratégie utilisée pour créer un verre métallique consiste à refroidir le liquide assez vite, d'une température supérieure à la température du liquidus à une température inférieure à la température de vitrification. Si le passage dans la région intermédiaire est assez rapide, les cristaux n'auront pas le temps de se former.

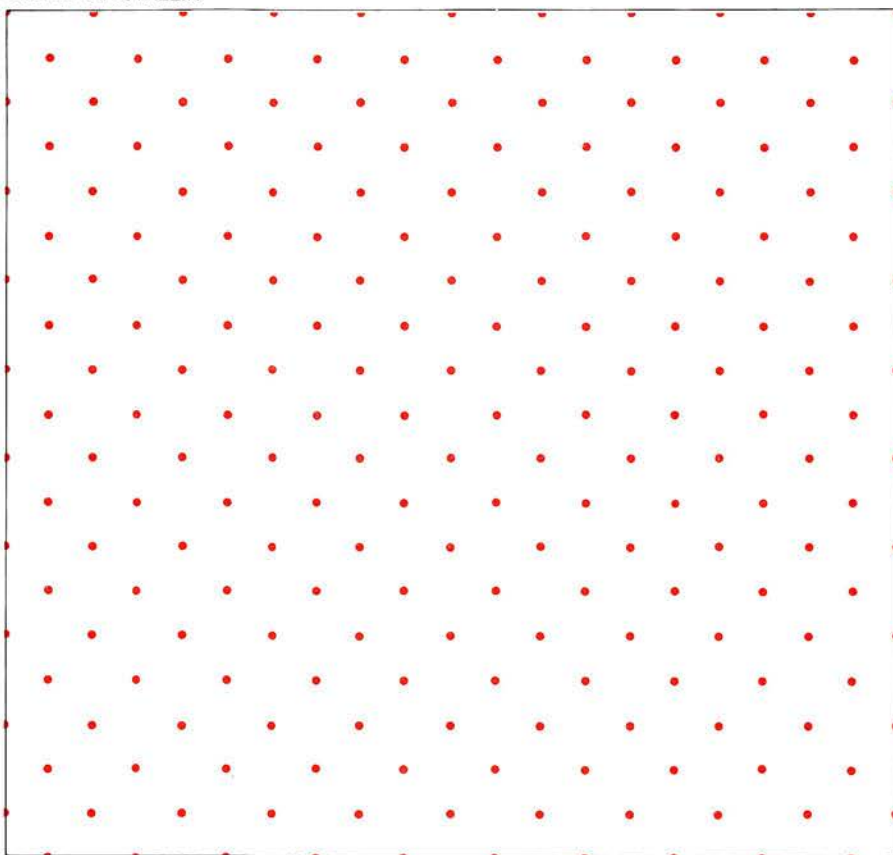
Pol Duwez, Ronald Willens et leurs collègues de l'Institut de Technologie de Californie montrèrent en 1960 qu'un métal pouvait être trempé à partir d'un état en fusion dans un état vitreux. Le principe de leur technique de fabrication de verres métalliques est encore employé aujourd'hui dans la méthode dite de filature par fusion. Un jet de métal en fusion est envoyé sur la surface d'un disque ou d'un cylindre en rotation, dont la température est maintenue inférieure ou égale à la température ambiante. Le liquide s'étale sur le disque en un film épais de quelques micromètres. Comme le film est extrêmement mince et en contact étroit avec un puits de chaleur de volume beaucoup plus grand, et comme de plus les métaux ont une conductivité thermique importante, le métal se refroidit et se solidifie très rapidement. Le métal peut alors être refroidi de 1 000 kelvins en une milliseconde, soit à une vitesse d'un million de degrés par seconde.

Grâce à un refroidissement aussi rapide, Pol Duwez et ses collaborateurs solidifièrent un alliage d'or et de silicium de composition $\text{Au}_{81}\text{Si}_{19}$ dans une forme qui semblait bien amorphe; des études complémentaires confirmèrent ensuite la nature non cristalline de la substance. Ces résultats stimulèrent la plupart des travaux ultérieurs sur les verres métalliques, travaux qui menèrent à la découverte de nombreux autres alliages, qu'on pouvait tremper en un état vitreux de façon analogue.

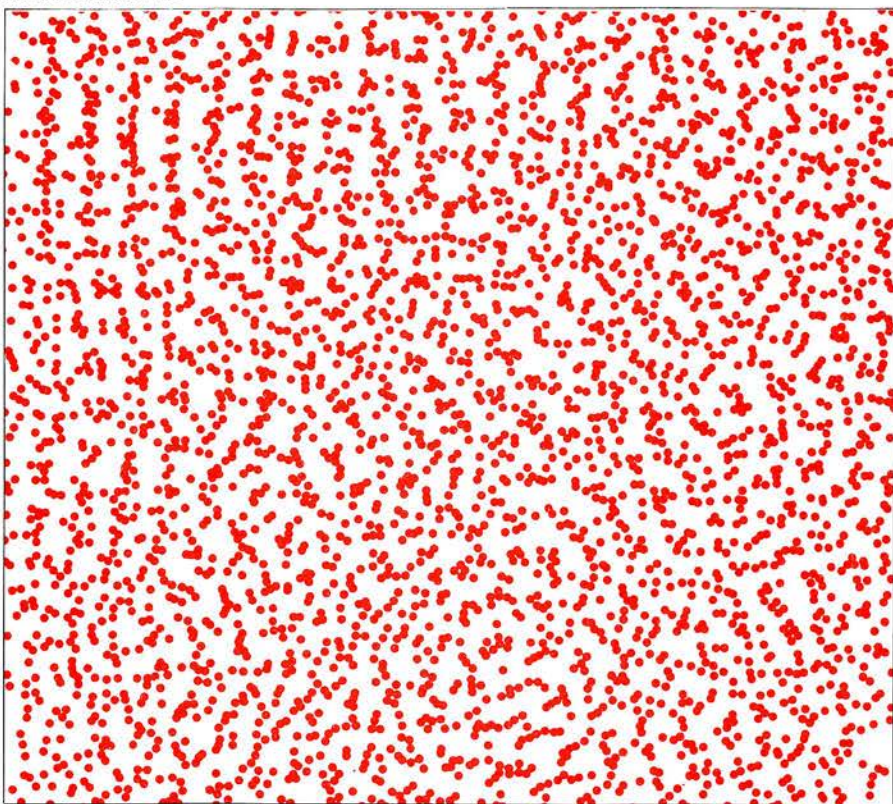
On peut fabriquer des métaux amorphes par d'autres méthodes qui ne nécessitent pas que le métal fondu passe par la température du liquidus. Par exemple, on peut déposer une pellicule amorphe sur une surface froide à partir d'une solution ionique ou d'une vapeur métallique. En fait, on avait déjà observé de tels films avant les travaux de Pol Duwez, mais personne n'avait établi avec certitude leur nature amorphe. On peut aussi fabriquer un solide amorphe en irradiant un métal cristallin avec des particules de haute énergie qui brisent le réseau atomique.

Certains chercheurs pensaient que le terme « verre » devait être réservé à des matériaux formés par la solidification continue d'une substance fondue, et n'accordaient pas cette désignation aux métaux amorphes créés par condensation ou irradiation.

SOLIDE CRISTALLIN



SOLIDE AMORPHE



1. DES SOLIDES CRISTALLINS OU AMORPHES ont des densités (nombres moyens d'atomes par unité de volume) semblables mais la disposition des atomes est différente. La structure des solides est représentée ici par les projections sur un plan des positions des atomes, comme si les solides étaient éclairés par des rayons lumineux parallèles et qu'on ne voyait que les ombres. Dans le cristal, la structure est périodique sur de grandes distances; la connaissance des positions de quelques atomes détermine la position de tous les autres atomes du cristal. Dans le solide amorphe, la structure n'est pas périodique. L'ordre dans la disposition des atomes n'existe que sur de courtes distances. La connaissance des coordonnées des atomes dans une région n'est d'aucune aide pour prédire les positions des atomes plus éloignés.

Cependant, il apparaît maintenant que les matériaux amorphes fabriqués par ces divers moyens ont des structures et des propriétés similaires. Nous trouvons par conséquent peu justifié de faire une telle distinction dans la nomenclature et nous désignons par « verre » tous ces matériaux.

Les caractéristiques de la transition liquide-verre

Une propriété caractéristique de la solidification ordinaire (la transition d'une phase liquide à une phase solide cristallisée) des substances pures est qu'elle se produit d'une manière discontinue, à une température fixe. Lorsqu'on prélève de la chaleur à un liquide, sa température descend jusqu'à ce qu'il commence à se cristalliser; la chaleur supplémentaire est alors prélevée à température constante jusqu'à solidification complète. De

nombreuses autres propriétés changent également de façon discontinue au point de solidification, par exemple la densité ou la capacité calorifique (la quantité de chaleur nécessaire à une substance pour que sa température s'élève d'un degré).

Le gel de la configuration observé à la température de vitrification n'est pas une transition si brutale, mais ce n'est pas non plus une transition parfaitement continue. La transition vitreuse est caractérisée par une brusque augmentation du temps nécessaire à tout réarrangement de la structure atomique; ainsi dans un liquide, ce temps est bien inférieur à une seconde (pour l'eau par exemple, il est de l'ordre de 10^{-12} seconde); à la température de vitrification, il atteint une valeur de l'ordre du jour.

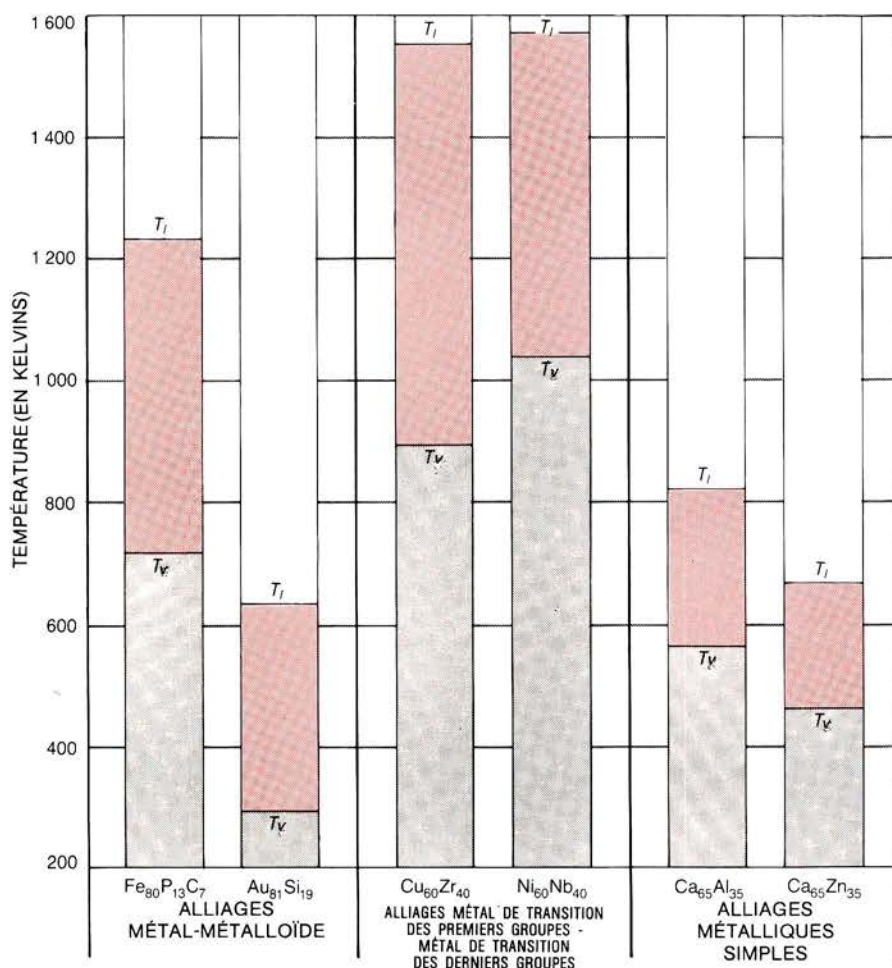
Le temps nécessaire à une modification de la configuration atomique se reflète expérimentalement dans la viscosité du matériau, qui mesure sa

résistance à un changement de forme. L'unité de viscosité est la poise, définie comme la force (en dyne par centimètre carré) qu'on doit appliquer à un fluide pour maintenir une différence de vitesse d'un centimètre par seconde entre deux plans parallèles distants d'un centimètre. Les liquides habituels comme l'eau ou le mercure ont une viscosité de l'ordre d'un centième de poise; à la température de vitrification, la viscosité croît rapidement à une valeur de 10^{15} poises. Un matériau qui résiste autant à un changement de forme est suffisamment rigide pour qu'on le considère comme un solide.

La transition du liquide au verre s'accompagne aussi d'une chute brutale de la capacité calorifique et du coefficient d'expansion thermique (ce dernier paramètre mesure la variation de volume qui accompagne un changement de température). Ces deux propriétés sont liées à la liberté de mouvement des atomes ou au nombre de configurations distinctes qu'ils peuvent prendre. Comme le fit remarquer Walter Kauzmann de l'Université de Princeton, la brusque décroissance de la capacité calorifique et du coefficient d'expansion thermique est directement associée au gel de configuration.

Les caractéristiques des transitions liquide-verre décrites ici ont été mesurées la plupart du temps sur des verres non métalliques. Plus récemment, Ho Sou Chen et l'un des auteurs (D. Turnbull) ont montré que les alliages métalliques susceptibles de se vitrifier présentaient des propriétés similaires. La mesure de ces quantités est difficile: en effet on ne peut observer expérimentalement le domaine de température compris entre la température de vitrification et la température du liquidus, puisque les métaux liquides ne peuvent pas être maintenus à ces températures sans cristalliser. On a montré néanmoins que la viscosité croissait brutalement au passage par la température de vitrification. On a aussi vérifié que la transition inverse (où l'on chauffe un verre jusqu'à ce qu'il se liquéfie) s'accompagne d'un accroissement de la capacité calorifique et du coefficient d'expansion thermique.

Les températures de vitrification et de solidification commençante ont des valeurs très différentes pour les divers alliages métalliques étudiés. Afin de comparer différentes substances entre elles, il est plus significatif de considérer le rapport de ces deux quantités, c'est-à-dire la température de vitrification divisée par la température de solidification commençante (en kelvins). Ce rapport est appelé température réduite de vitrification. On pressent qu'un matériau de température réduite de vitrification élevée est plus facile à solidifier dans l'état vitreux (avec une



2. LES TEMPERATURES DE TRANSITION auxquelles se forment les métaux cristallins et les métaux vitreux ont une influence majeure sur la facilité avec laquelle un alliage peut être vitrifié. La température du liquidus T_l est la température à laquelle la phase cristalline commence à apparaître lorsque l'on refroidit le liquide. La température diminuant davantage, la substance doit traverser une région où la cristallisation est possible, avant que la configuration des atomes soit gelée à la température de vitrification (T_g). Le quotient de cette température de vitrification par la température du liquidus T_g/T_l est appelée température réduite de vitrification; elle définit la grandeur relative de la région où la cristallisation peut empêcher la vitrification. Pour traverser cette région sans cristalliser, le métal doit être refroidi rapidement d'une température supérieure à la température du liquidus à une température inférieure à la température de vitrification. On peut vitrifier, par cette trempe rapide, trois classes d'alliages. On a indiqué ici les températures de transition d'alliages typiques de ces trois classes.

vitesse de refroidissement plus modérée) puisque l'intervalle de températures dans lequel la cristallisation peut avoir lieu est alors relativement réduit. Dans la plupart des cas cette prévision est confirmée expérimentalement. Pour des matériaux qui peuvent atteindre l'état vitreux lors d'un refroidissement lent (les silicates par exemple), la température réduite de vitrification est généralement supérieure à $2/3$. Autrement dit, la température de solidification commençante n'est pas supérieure à une fois et demie la température de vitrification. Pour la plupart des alliages métalliques, qui nécessitent une trempe rapide, la température réduite de vitrification est à $2/3$ et atteint parfois la valeur 0,45.

La nature métastable de la phase amorphe apparaît lorsque l'on chauffe un verre. Même avant que la fusion ne commence, l'échantillon peut cristalliser par la formation et la croissance de centres de nucléation à l'état solide. La température à laquelle ce phénomène est observé (la température de cristallisation cinétique) dépend du nombre de centres de nucléation présents et de la vitesse de chauffage. Un chauffage lent abaisse la température de cristallisation cinétique, car le cristal a alors plus de temps pour se développer. On peut mesurer grossièrement la résistance à la cristallisation d'un verre par l'écart entre la température de cristallisation cinétique et la température de vitrification. Certains matériaux, le silicium fondu par exemple, ne cristallisent pas (ils restent à l'état surfondu) quand ils ne sont pas en contact avec des centres de solidification extérieurs, et ceci quelle que soit la température et la durée de l'expérience. Pour les verres métalliques en revanche, à quelques exceptions près, un chauffage minime au-dessus de la température de vitrification suffit pour provoquer la cristallisation. Pour beaucoup d'alliages, la température de cristallisation cinétique est inférieure à la température de vitrification, ce qui rend son observation plus difficile. Il ne faudrait pourtant pas en conclure que les verres métalliques sont thermiquement instables. En fait, nombre d'alliages restent indéfiniment à l'état vitreux à la température ambiante.

Portée des interactions et structure

Une caractéristique fondamentale de la structure d'un verre est de ne pas avoir d'ordre à longue distance. La connaissance des positions des atomes dans une région d'un solide amorphe ne permet pas de prédire les positions dans une région éloignée. A courte distance cependant, c'est-à-dire pour des distances de

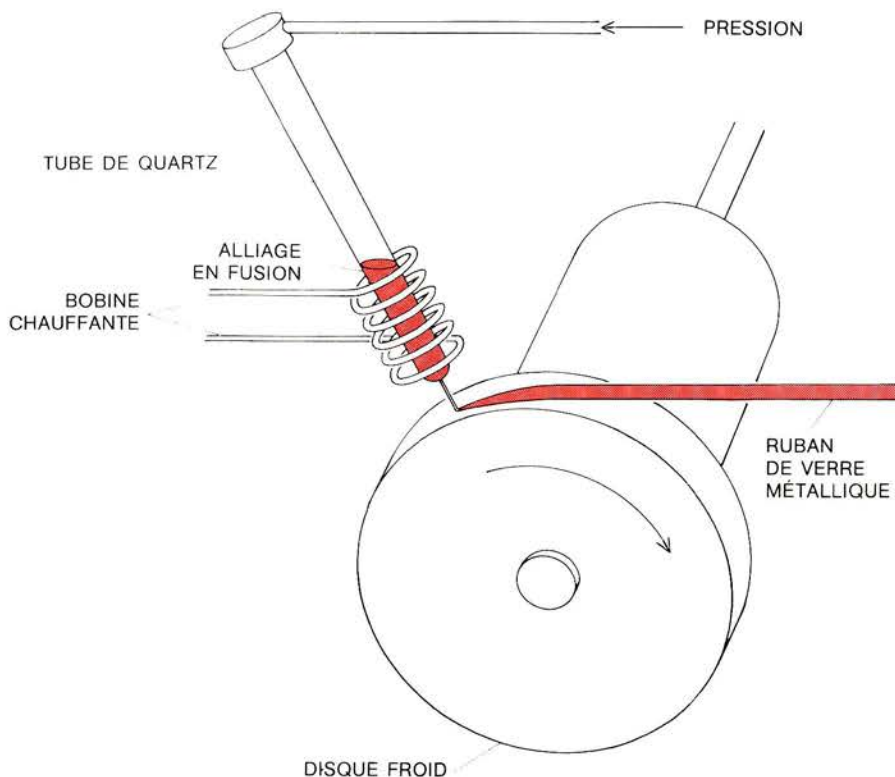
quelques espaces interatomiques, on peut observer un certain ordre. Ce n'est que dans les gaz raréfiés, là où les atomes se déplacent pratiquement indépendamment les uns des autres, que leur distribution devient vraiment aléatoire. Dans les solides et les liquides, les atomes doivent être assez près les uns des autres pour que la densité ait la valeur observée, et il n'existe qu'un nombre limité de façons de satisfaire cette condition. Il en résulte qu'il doit exister un certain ordre à courte distance dans la structure du matériau.

Les liquides et les solides, qu'ils soient cristallisés ou amorphes, ont à peu près la même densité. Cette observation indique que le nombre de plus proches voisins entourant un atome et la distance moyenne entre atomes sont semblables dans les deux phases. On a néanmoins des raisons de penser que la topologie de l'arrangement des atomes dans un cristal est bien différente de celle d'un liquide. Si l'on prend garde de ne pas introduire de sources de nucléation extérieures, nombre de liquides peuvent rester à l'état surfondu à des températures 20 à 30 pour cent inférieures à la température de solidification commençante. Cette résistance à la solidification, même lorsque celle-ci est énergétiquement favorable, suggère que la structure cristalline n'est pas une configuration fréquente lors des fluctuations aléa-

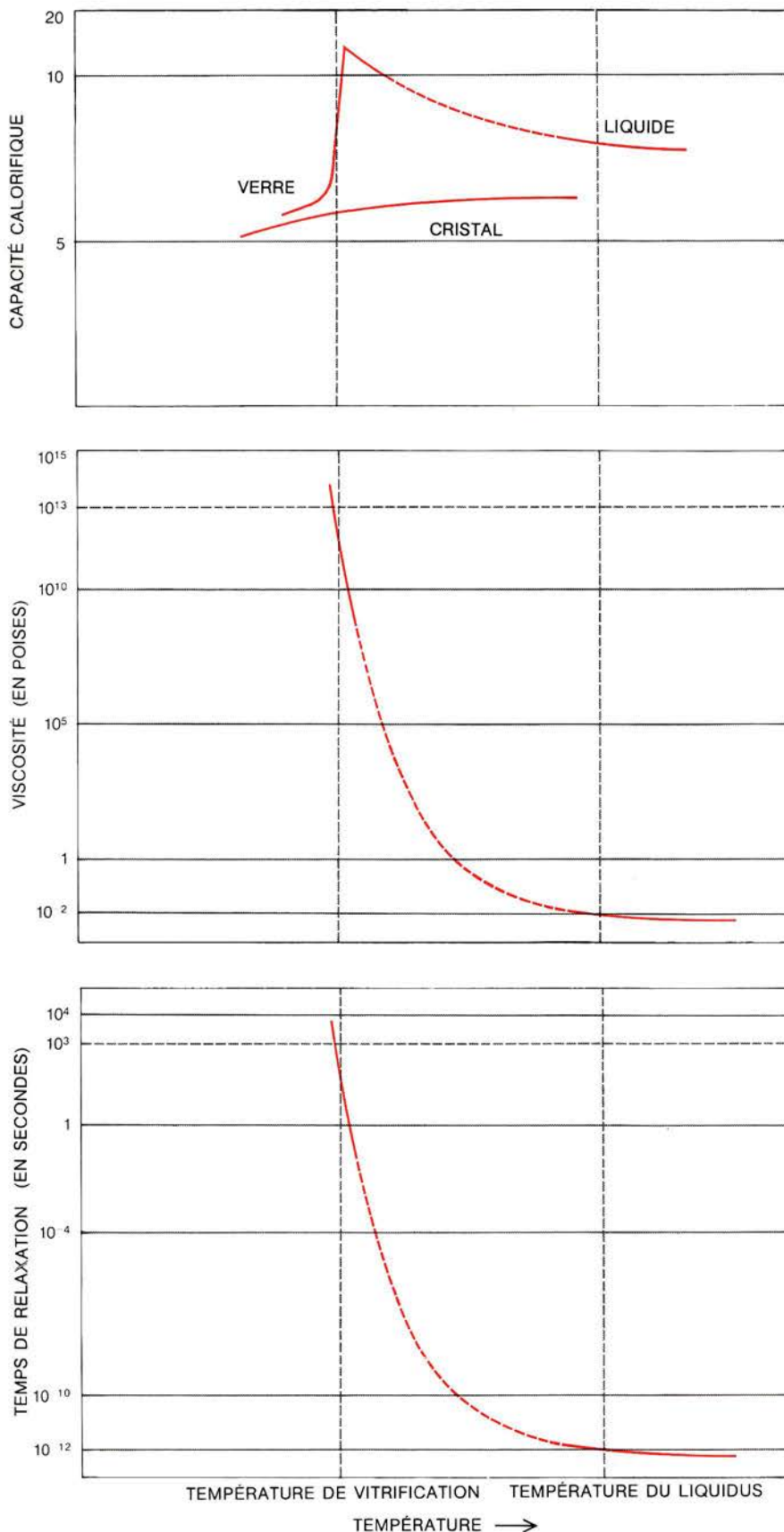
toires des atomes dans le liquide. L'ordre à courte distance dans l'état liquide ne semble pas, par conséquent, relié à l'ordre cristallin. Au contraire, on s'attend à ce que l'ordre à courte distance dans le liquide ressemble à l'ordre à courte distance dans le solide amorphe.

Pour construire un modèle de la structure atomique d'un métal, on peut supposer que les forces agissant entre les atomes ne le font pas selon des directions privilégiées et sont, au contraire, symétriques autour d'un atome donné. La structure correspondant à l'énergie totale minimale est celle où la densité est la plus élevée, c'est-à-dire où les atomes sont assemblés de la manière la plus compacte. Cependant les structures atomiques ne peuvent se recouvrir notablement l'une l'autre, car à courte distance, une force de répulsion les en empêche. Dans les modèles théoriques simples, les atomes sont assimilés à des sphères dures, si bien qu'aucun recouvrement n'est possible.

Considérons pour l'instant un assemblage d'atomes dans un système à deux dimensions, où les forces sont centrales et indépendantes de la direction. Les atomes sont représentés par des disques et l'unité d'assemblage la plus dense consiste en trois disques tangents dont les centres sont aux sommets d'un triangle équilatéral. Quand on ajoute des atomes supplémentaires, ceux-ci engendrent des



3. LA FILATURE PAR FUSION d'un alliage en fusion est la méthode la plus utilisée pour obtenir une grande vitesse de refroidissement. Le film métallique à la surface du rotor est refroidi rapidement parce qu'il est fin, parce que le rotor se comporte comme un puits de chaleur de grande capacité calorifique et parce que les métaux sont bons conducteurs. On a obtenu ainsi des vitesses de refroidissement d'un million de kelvins par seconde. On a adopté des techniques analogues pour fabriquer industriellement des verres métalliques.



4. LA TRANSITION LIQUIDE-VERRE s'accompagne de brusques changements de plusieurs propriétés. La capacité calorifique, c'est-à-dire la quantité de chaleur nécessaire à une élévation de température donnée, croît régulièrement lorsque le métal en fusion est refroidi au-dessous de la température du liquidus, puis décroît brutalement lorsque le liquide se vitrifie. La viscosité, qui mesure la résistance au changement de forme, augmente rapidement à la température de vitrification. Le temps de relaxation structurelle, c'est-à-dire le temps requis pour un réarrangement des atomes, varie de la même façon. Les portions de courbes en pointillés représentent des températures où on ne peut pas mesurer ces propriétés car la substance cristalliserait pendant le temps nécessaire à la mesure.

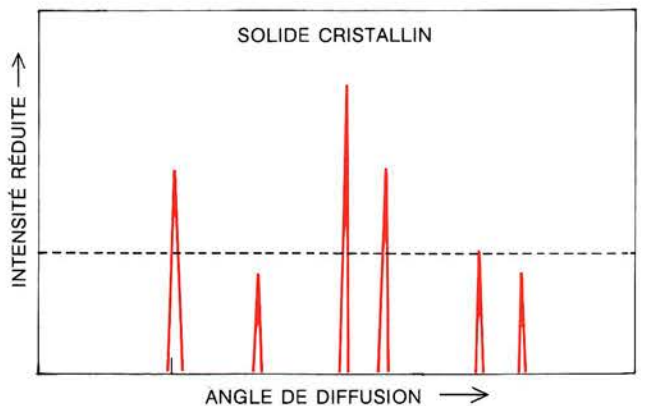
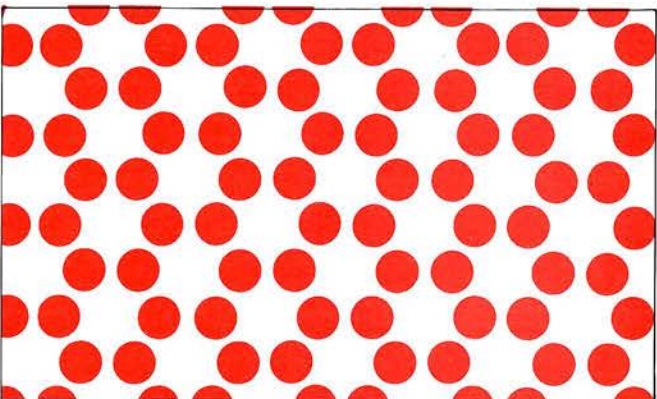
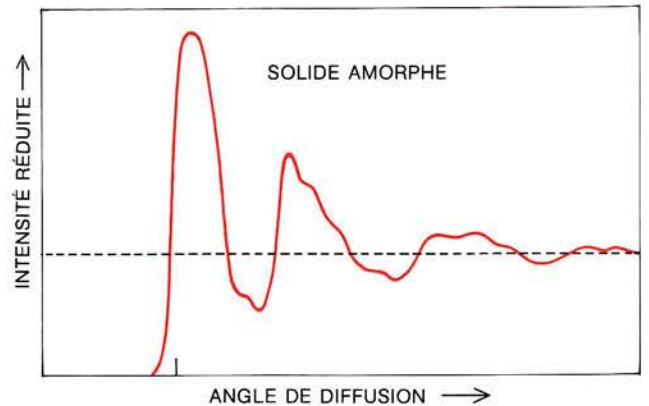
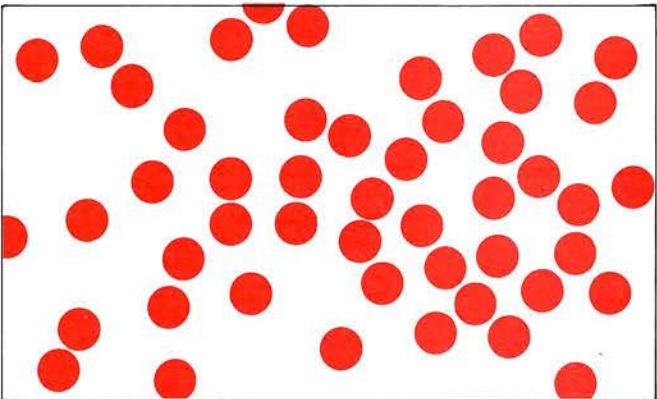
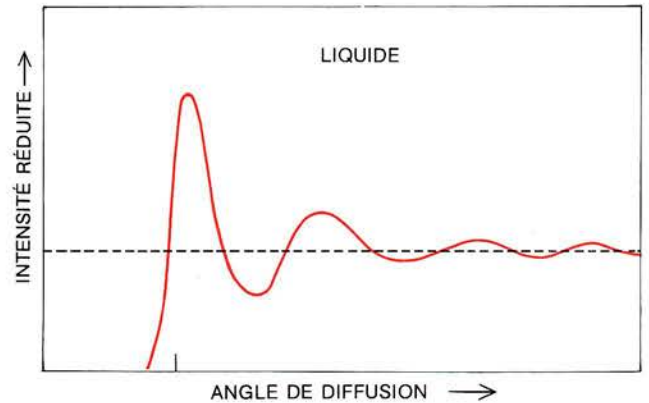
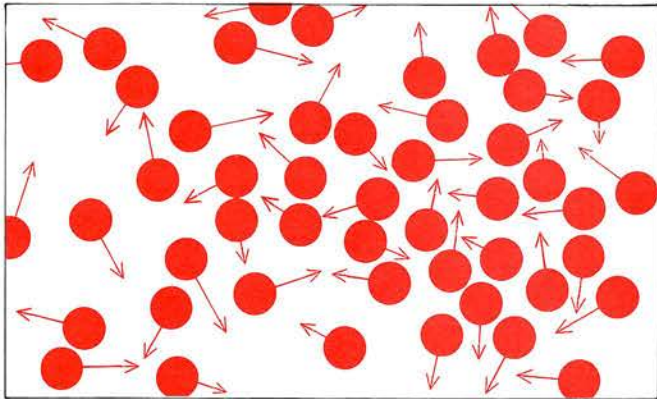
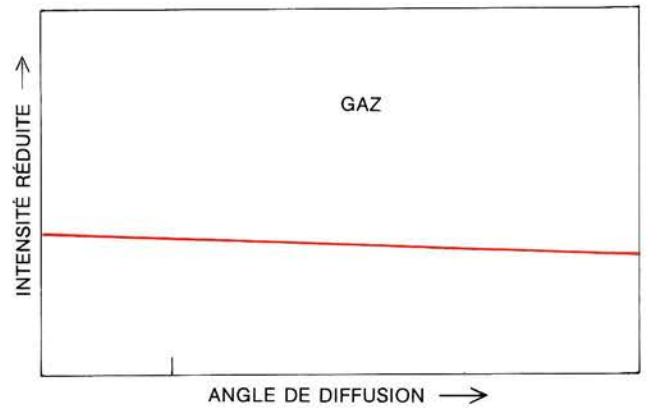
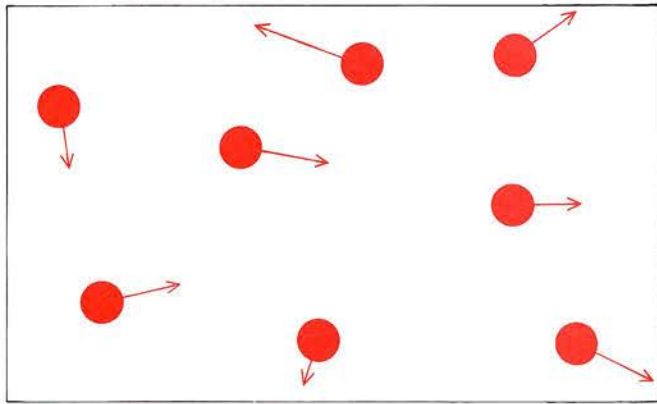
cellules triangulaires identiques qui peuvent recouvrir tout le plan. Dans cette configuration, chaque atome est entouré de six voisins qui forment un hexagone régulier. Une telle structure est évidemment cristalline puisque parfaitement ordonnée. Il est cependant important de souligner que cette structure, en dépit de son ordre à longue distance, est engendrée par des forces interatomiques à courte distance. Que le système soit formé de trois ou de nombreux atomes, aucune configuration ne peut avoir une densité plus élevée ou une énergie plus basse. Pour cette raison, l'ordre à courte distance, dans une substance bidimensionnelle devrait être le même, que la substance soit dans l'état liquide, l'état cristallin ou l'état solide amorphe. De plus, la résistance à la cristallisation d'une telle substance devrait être faible.

L'assemblage d'objets dans l'espace à trois dimensions est fondamentalement différent. Les atomes étant représentés par des sphères, l'unité élémentaire d'assemblage le plus dense est un ensemble de quatre atomes en contact, chaque atome étant à un sommet d'un tétraèdre régulier. Un fait géométrique d'importance capitale pour la structure des solides est que l'espace ne peut pas être rempli par des assemblages de tétraèdres réguliers. Il est vrai qu'on peut assembler quelques tétraèdres sans difficulté, mais on ne peut alors en ajouter d'autres qu'en les déformant ou en laissant des vides. Dans les deux cas, la densité obtenue est moins grande et l'énergie totale est accrue. Le tétraèdre seul ne peut donc être l'unité élémentaire d'une structure cristalline; dans le réseau cristallin le plus dense un octaèdre s'intercale entre deux tétraèdres, mais la structure résultante est moins dense et l'énergie par atome est plus grande que pour le tétraèdre seul.

Les modèles de verre métallique

Ces considérations géométriques sur l'assemblage des atomes à trois dimensions ont profondément marqué les études des modèles de structure amorphe. Bien qu'en définitive la structure cristalline représente toujours l'état d'énergie totale minimale d'un ensemble important d'atomes, il n'en est pas de même pour un amas de quelques atomes seulement. Un tel amas peut être plus dense et avoir une énergie inférieure dans une configuration polyédrique. Plusieurs modèles, qui tentent de reproduire la structure des liquides et des solides amorphes, utilisent cette propriété.

On a proposé trois modèles principaux de verres métalliques. Dans les modèles microcristallins, on suppose que les métaux amorphes sont constitués d'innombrables petites régions de structure cristalline (ordre à courte



5. LA DISTRIBUTION DES ATOMES dans une substance peut être déduite des clichés de diffraction de rayons X par les atomes. Les courbes indiquent l'intensité réduite du rayonnement diffracté en fonction de l'angle de diffusion. L'intensité réduite est déduite de l'intensité mesurée par renormalisation. Pour un gaz raréfié, l'intensité réduite est essentiellement uniforme dans un grand domaine d'angles de

diffusion, ce qui montre que la distribution des atomes est aléatoire. Les liquides et les solides amorphes ont des courbes d'intensité réduite très modulées. Une telle courbe suggère que les positions d'atomes voisins sont corrélées mais qu'il n'y a pas d'ordre à longue distance. La courbe d'intensité réduite d'un cristal présente une série de pics étroits qui reflète la disposition régulière des atomes sur de grandes distances.

distance) plongées dans une matrice d'atomes reliés aléatoirement. En moyenne, les microcristaux sont formés d'une centaine d'atomes chacun; c'est dire qu'ils sont beaucoup plus petits que les grains les plus fins d'un vrai métal cristallin. Puisque ces cristaux miniatures sont dispersés à travers le solide et orientés aléatoirement, on ne peut discerner aucun ordre à longue distance. Ici, la nature de la matrice reliant les microcristaux n'est pas explicitée en détails.

Un autre type de modèle, d'intérêt historique, a été proposé par J. D. Bernal pour expliquer la structure des liquides simples. Il considère l'assemblage dense aléatoire de sphères dures. Pour engendrer le modèle, le processus consiste à ajouter des sphères une à une à un amas de sphères. Chaque balle est placée dans la zone libre la plus proche du centre de l'amas. De cette façon, on devrait créer la configuration la plus dense possible. Les quatre premières sphères forment évidemment un tétraèdre. La cinquième peut être placée sur n'importe laquelle des quatre faces symétriques du tétraèdre puisqu'elles sont équidistantes du centre. Lorsque l'amas est beaucoup plus grand, il est moins facile de trouver la position correcte de la sphère ajoutée et la géométrie de cette structure évolutive est moins évidente.

La première étude de l'assemblage dense aléatoire fut faite à l'aide d'un modèle physique. J. D. Bernal et ses collègues introduisaient les billes métalliques dans la vessie en caoutchouc d'un ballon de football et la pétrissaient jusqu'à ce qu'elle ne puisse plus contenir de billes. Ils injectaient de la cire dans la vessie pour fixer la position des billes puis enlevaient la vessie. Les coordonnées de chaque bille étaient alors relevées soigneusement. Il est plus facile aujourd'hui de construire un modèle à l'aide d'un ordinateur qui détermine mathématiquement les positions correctes des billes. L'équivalent du «pétrissage» manuel est une procédure de «relaxation» qui mesure les forces agissant sur chaque bille; si elles ne sont pas équilibrées, on peut modifier légèrement les positions des billes pour réduire les tensions. De tels processus de relaxation agissent certainement pour réduire l'énergie des solides réels.

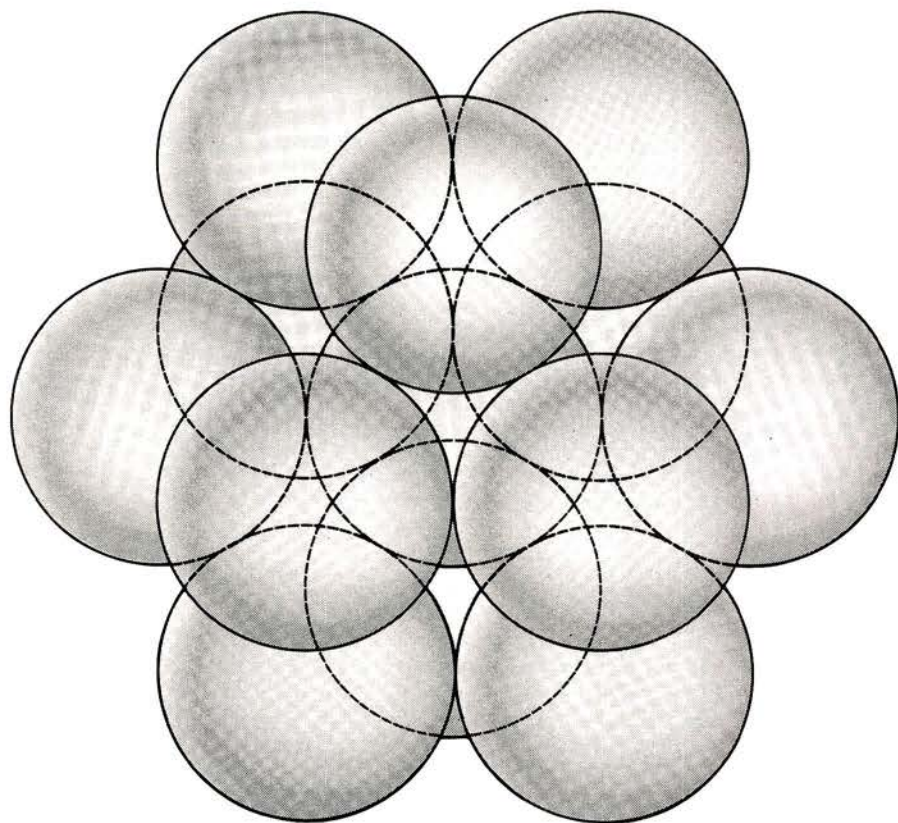
Quelle structure obtient-on par cette méthode? J. D. Bernal a montré qu'elle était composée d'un ensemble de tétraèdres déformés et combinés à de petits espaces vides limités par des faces triangulaires. L'un de nous (P. Chaudhari) et ses collaborateurs, et indépendamment G. Connell, qui est maintenant au Centre de Recherche de la Compagnie Xerox à Palo Alto en Californie, ont ensuite

montré que la configuration dense aléatoire est topologiquement équivalente à un réseau aléatoire où les nœuds du réseau sont tous reliés entre eux par quatre liaisons.

La troisième classe de modèles découle du fait que pour un ensemble formé d'un petit nombre d'atomes une configuration tétraédrique est plus dense que n'importe quelle autre configuration cristalline. F. Frank de l'Université de Bristol a démontré que l'empilement tétraédrique était le plus dense pour moins de 13 atomes. Michael Hoare de l'Université de Londres et James Burton de l'Institut Gur Ayeah de New York ont effectué plus récemment des calculs fondés sur des forces interatomiques plausibles: ils ont montré qu'un amas polyédrique est plus stable qu'un amas cristallin lorsqu'il n'y a pas plus de 50 atomes. On a aussi des confirmations expérimentales indirectes de l'existence des amas polyédriques. Jean Farges de l'Université de Paris Sud a montré que des groupes de quelques dizaines d'atomes d'argon pouvaient résulter de la condensation de vapeur. La structure de ces amas semble ressembler beaucoup à celle qui est prédite pour des agrégats polyédriques. On doit cependant remarquer que ces amas d'argon sont isolés, alors que les ensembles polyédriques d'un métal amorphe doivent être interconnectés par un ensemble d'atomes disposés selon une autre configuration.

Tous ces modèles reposent sur des hypothèses simplificatrices; l'une d'entre elles est qu'ils décrivent tous des matériaux purs ou à un seul élément (toutes les sphères sont identiques) alors qu'aucun métal pur n'a encore été solidifié dans l'état vitreux. Il semble que seuls les alliages de plusieurs métaux puissent exister à l'état vitreux. Les modèles microcristallin et polyédral souffrent d'un défaut supplémentaire: on n'y tient pas compte de la matrice d'interconnexion, qui peut constituer la moitié du matériau. Il est néanmoins possible de comparer les modèles aux données expérimentales concernant la structure des métaux amorphes réels.

La principale source d'information sur la structure microscopique des verres est la diffraction de rayons X, d'électrons et de neutrons par les atomes. L'échantillon est par exemple irradié par des rayons X dont la longueur d'onde est comparable au diamètre de l'atome. L'intensité de la radiation diffractée est ensuite mesurée en fonction de l'angle dont elle est déviée. Du spectre de diffraction, on déduit la distribution moyenne des atomes. La diffraction de rayons X par un cristal isolé permet de connaître les coordonnées précises des atomes. Dans le cas des matériaux amorphes, l'information recueillie est moins complète; leur structure désordonnée fait qu'on ne peut déter-



6. LE MODELE MICROCRISTALLIN de la structure des verres métalliques suppose qu'ils sont formés de nombreux amas cristallins, chaque amas comprenant une centaine d'atomes. L'amas dessiné présente la disposition d'atomes la plus dense possible pour un cristal; autrement dit, c'est la configuration la plus compacte qui puisse être répétée à l'infini dans l'espace. Dans le modèle microcristallin, de tels amas doivent être reliés entre eux par un réseau d'atomes dont la disposition est différente. La nature de ce «tissu de liaison» n'a pas été spécifiée en détail.

miner que les distances interatomiques et non les directions. Cette méthode fut appliquée pour la première fois aux solides amorphes par Frits Zernike et J. Prins en 1927.

Les structures expérimentalement observées

Dans le cas d'un gaz mono-atomique, la courbe représentant l'intensité du rayonnement diffracté n'a pas de forme caractéristique, ce qui indique une absence totale de corrélation entre les positions des atomes. Un atome étant choisi comme référence, les autres atomes peuvent se trouver à n'importe quelle distance avec une probabilité égale. Dans le cas d'un solide cristallin, la courbe présente une suite de pics étroits qui résultent de la corrélation presque parfaite des positions atomiques à travers le volume du cristal. Les courbes de diffrac-

tion des liquides et des solides amorphes ont une structure intermédiaire : l'intensité est fortement modulée mais les courbes ne présentent pas des pics aussi bien définis que dans le cas de cristaux, et ces pics sont noyés dans un fond continu important. La forme globale de la courbe est remarquablement similaire dans les cas du liquide et du verre, mais le verre révèle une structure plus fine rendue inobservable dans le liquide par le mouvement de translation des atomes.

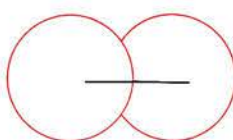
Avant d'interpréter la courbe d'intensité diffractée, on doit lui appliquer une transformation mathématique. La courbe obtenue alors est appelée fonction de distribution radiale : elle exprime la densité moyenne d'atomes en fonction de leur distance à un atome de référence. Une seconde courbe utilisée est la fonction de distribution binaire. On l'obtient en soustrayant de la fonction de distribu-

tion radiale certaines contributions à l'intensité diffusée, la diffraction par des atomes isolés par exemple. La fonction de distribution binaire donne le nombre de paires d'atomes en fonction de la distance entre les atomes formant une paire.

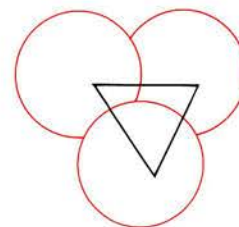
La fonction de distribution radiale typique d'un verre métallique comporte une série de quatre ou cinq pics d'amplitude décroissante. La surface comprise sous un pic donné est proportionnelle au nombre d'atomes se trouvant à cette distance; la largeur du pic indique la densité du compactage à cette distance particulière. Le premier pic, qui représente la contribution des atomes les plus proches, est relativement étroit car les plus proches voisins sont presque tous à la même distance; en fait leurs positions sont les plus voisines possibles de l'atome de référence. A plus grandes distances, les pics sont plus larges, et à des distances supérieures à



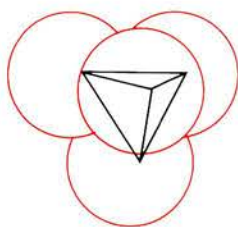
1



2



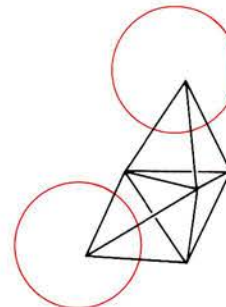
3



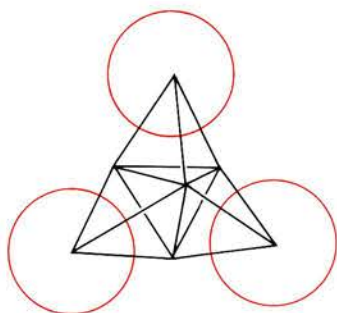
4



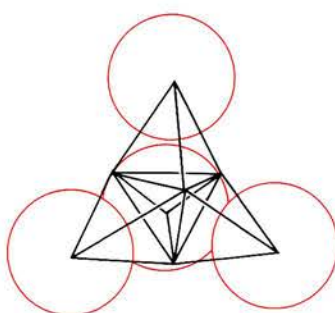
5



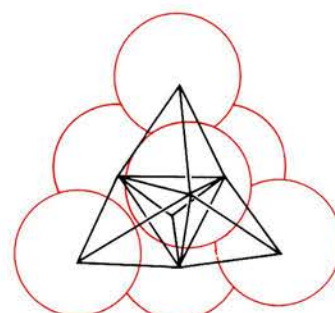
6



7



8



12

7. LE MODELE D'ASSEMBLAGE DENSE ALEATOIRE qui représente l'ordre à courte portée dans un verre métallique est construit en assemblant des sphères dures en une configuration compacte. A chaque étape de la construction, une sphère est ajoutée dans une position quelconque située le plus près possible du centre de l'amas en formation. Les quatre premières sphères forment un tétraèdre régulier.

La configuration tétraédrique est la plus dense possible (plus dense que n'importe quel cristal) mais elle ne peut être étendue indéfiniment car des tétraèdres réguliers ne peuvent pas remplir l'espace sans laisser des vides entre eux. La structure obtenue par ce procédé d'assemblage dense aléatoire est néanmoins principalement constituée de tétraèdres. Ce modèle a été proposé par J. D. Bernal.

quatre diamètres atomiques environ, les pics disparaissent entièrement, la densité des atomes approchant la densité moyenne uniforme de la substance considérée.

Dans tout modèle de structure amorphe, on connaît exactement les positions des atomes; calculer la fonction de distribution radiale et la fonction binaire est donc immédiat; il suffit à peu de choses près de tabuler les distances entre toutes les paires d'atomes du modèle. On peut alors comparer la fonction calculée dans le cadre du modèle avec la fonction expérimentalement observée par diffraction de rayons X ou d'autres radiations. De telles comparaisons ont sérieusement ébranlé la validité du modèle microcristallin. La fonction de distribution radiale calculée dans ce modèle ne correspond pas très bien à la fonction observée. On obtient un meilleur accord avec le modèle des assemblages aléatoires denses, en particulier avec la version de ce modèle dans laquelle les positions des atomes peuvent être relaxées.

La fonction de distribution radiale n'est pas d'un grand secours pour choisir entre le modèle des assem-

blages aléatoires denses et le modèle polyédrique. Il existe néanmoins un autre critère de choix entre ces modèles. Parmi les indices les plus significatifs en faveur du modèle polyédrique, on doit citer la récente démonstration, faite par J. Farges, selon laquelle les atomes d'argon adoptent une telle structure lorsqu'il y a condensation à partir de la phase vapeur. Cette observation prouve au moins qu'une configuration atomique polyédrique peut réellement exister.

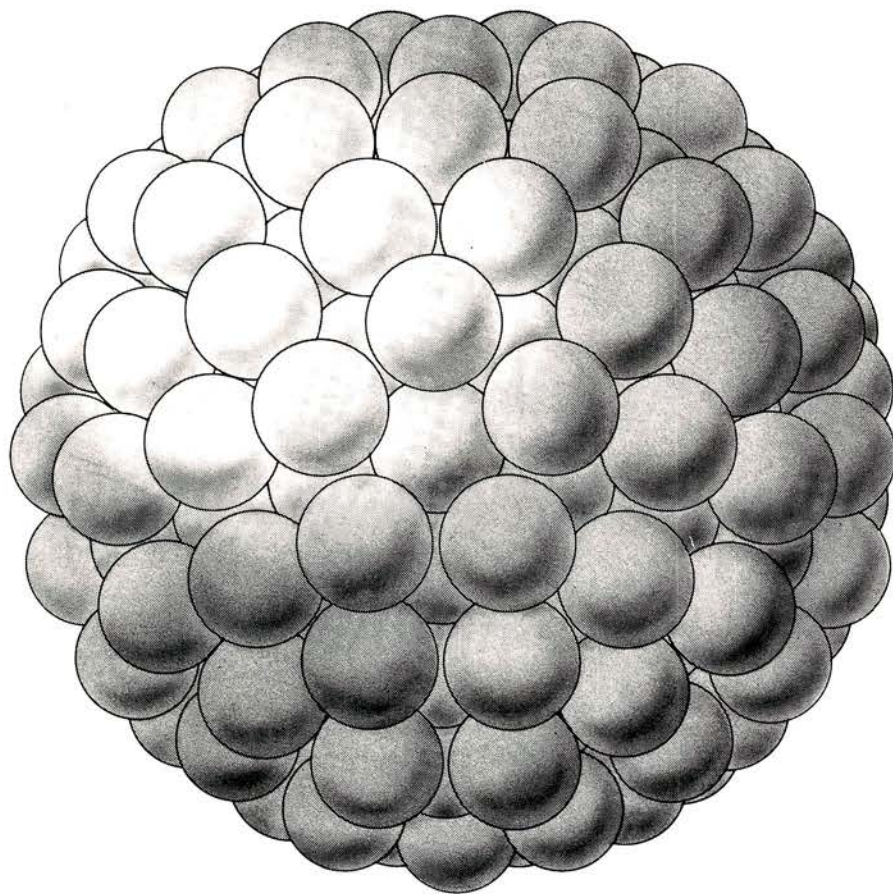
Il existe néanmoins un autre aspect de la démonstration. L'argon que J. Farges a condensé est un corps pur; si les assemblages polyédriques d'atomes d'argon se formaient par le même mécanisme que celui qui entre en jeu lors de la formation de verres métalliques, on devrait pouvoir fabriquer des verres de métaux purs. Même si de tels verres ne peuvent être obtenus par la trempe d'un liquide, on devrait pouvoir les observer dans des substances formées par condensation d'une vapeur, comme dans les expériences qui ont été réalisées sur l'argon. En fait, il semble que la présence de quelques impuretés soit, dans les deux cas, nécessaire à la vitrification.

Les constituants des verres métalliques

Les éléments présents dans les alliages amorphes proviennent de plusieurs parties du tableau périodique. Ce sont des métaux de transition, ceux des premiers groupes (comme le zirconium et le niobium) comme ceux des derniers groupes (le fer et le nickel), des métaux nobles (l'or et le palladium), des métaux simples (le calcium et l'aluminium), des terres rares (le gadolinium) et des métalloïdes (le silicium, le phosphore, le carbone et le bore). La plupart des alliages susceptibles d'être refroidis de l'état liquide à l'état amorphe peuvent être classifiés en trois groupes. Le premier groupe est celui de l'alliage or-silicium que Pol Duwez et ses collègues étudièrent il y a 20 ans; ces alliages combinent un métal noble ou un métal de transition des derniers groupes avec un ou plusieurs métalloïdes. Parmi ces compositions susceptibles de se vitrifier (à condition, généralement, que les métalloïdes soient dans une proportion d'environ 20 pour cent), on trouve des alliages eutectiques de température de solidification commençant exceptionnellement basse. La plupart des alliages contenant du fer, utilisables en vue d'applications technologiques, font partie de ce groupe. Un grand nombre d'entre eux furent préparés pour la première fois par S. Chen, Donald Polk et R. Ray, qui travaillaient alors à la Société Allied Chemical.

Le second groupe de verres métalliques, découvert par l'un de nous (B. Giessen) et par Nicholas Grant de l'Institut de Technologie du Massachusetts, est celui des alliages formés d'un métal de transition des premiers groupes et d'un métal de transition des derniers groupes, comme l'alliage niobium-nickel $Nb_{40}Ni_{60}$. Les alliages du troisième groupe sont constitués exclusivement de métaux simples: ainsi l'alliage calcium-aluminium $Ca_{65}Al_{35}$. L'aptitude à la vitrification de ces métaux a été mise en évidence pour la première fois par B. Giessen et D. Polk, qui travaille actuellement à l'Université de Northeastern, et par H. Matyja et ses collaborateurs de l'Université Technique de Varsovie.

Dans la liste des métaux qui peuvent être condensés en une phase amorphe à partir de la phase vapeur, on retrouve un certain nombre de ces alliages et certains autres, lesquels ne peuvent être vitrifiés que par cette méthode. Les alliages de niobium et de germanium, d'argent et de cuivre, d'or et de cobalt ainsi que certains alliages de gadolinium et de cobalt font partie de ces derniers. Les premières études d'alliages amorphes obtenus par condensation de vapeur furent effectuées par S. Mader de la Société IBM, Arthur Nowick qui travaille à l'Université de Columbia, et



8. LE MODELE POLYEDRIQUE d'un verre métallique est construit en assemblant des atomes d'une manière régulière mais non cristalline. Pour des amas contenant jusqu'à 50 atomes, on a pu montrer que de tels modèles polyédriques avaient une énergie libre plus petite que n'importe quelle configuration cristalline. Dans un solide de grand volume, ces amas doivent être reliés entre eux par un réseau d'atomes, qui élèvent néanmoins l'énergie de la structure à une valeur supérieure à celle d'un cristal. Le modèle polyédrique présente une symétrie d'ordre cinq. Les objets ayant une symétrie d'ordre cinq ne peuvent pas remplir totalement l'espace. Le modèle montré contient 266 atomes et fut construit par Michael Hoare.

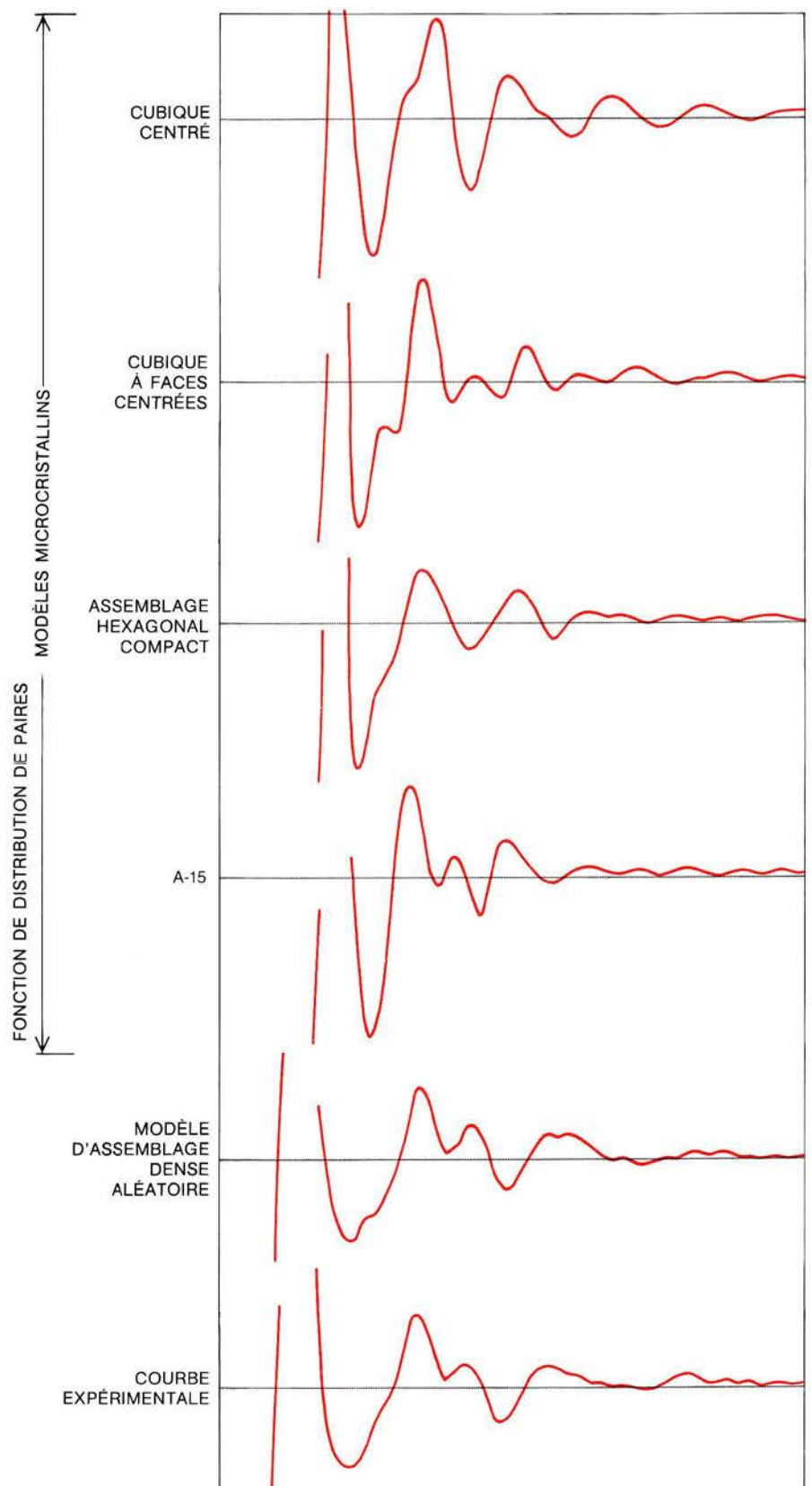
indépendamment par W. Bückel et R. Hilsch de l'Université de Göttingen. Les verres formés par des alliages de terres rares et de métaux de transitions furent découverts par des chercheurs d'IBM et du *Naval Ordnance Laboratory*.

Les méthodes classiques de préparation des verres métalliques à partir de l'état liquide dérivent toutes de la technique de la filature par fusion, dans laquelle un jet d'alliage en fusion est envoyé sur un rotor métallique froid. Le verre refroidi est éjecté du rotor tangentielllement en un ruban continu. Ce procédé a été adapté à grande échelle pour la production commerciale d'alliages vitrifiés. La méthode est économique puisque le ruban ou la feuille sont produits directement à partir de l'état liquide sans qu'une autre transformation soit nécessaire; elle est même quelquefois plus économique que la méthode utilisée pour fabriquer un solide cristallin. Pour cette raison, on peut utiliser les verres métalliques même dans des applications où leurs propriétés ne sont pas supérieures à celles des métaux cristallins.

Les propriétés des verres métalliques

De nombreuses propriétés des verres métalliques telles que leur densité, leur capacité calorifique, leur compressibilité, sont très proches de celles des métaux cristallins de même composition. Les différences apparaissent surtout dans les propriétés qui sont fonction de la direction des forces appliquées. Dans un cristal, la réponse à un champ électrique ou magnétique ou à une force de tension dépend de l'orientation de cette force ou de ce champ par rapport au réseau cristallin: elle est dite anisotrope. Comme un métal vitrifié ne présente aucun ordre sur de longues distances, sa réponse sera parfaitement isotrope, c'est-à-dire indépendante de la direction. D'autres particularités peuvent être attribuées au fait que la structure amorphe est essentiellement continue et homogène dans de grands volumes. Au contraire, la plupart des cristaux et, en particulier, la plupart des métaux cristallins sont composés de petits grains de cristaux aux bords irréguliers et aux orientations aléatoires.

Les verres silicatés sont des matériaux durs et fragiles, tout comme la plupart des solides cristallins dont la composition est voisine de celle des alliages qui peuvent être vitrifiés. Quelques verres métalliques, au contraire, sont ductiles et sont parmi les alliages les plus résistants à la tension. La réponse à une force de tension est isotrope et a des caractéristiques différentes de celles d'un verre au silicate ou d'un métal polycristallin.



9. LA FONCTION DE DISTRIBUTION DE PAIRES permet de comparer le modèle microcristallin et le modèle d'assemblage dense aléatoire avec les données expérimentales sur la structure des verres métalliques réels. La fonction qui peut être déduite des spectres de diffraction des rayons X exprime le nombre moyen de paires d'atomes en fonction de la distance entre les atomes dans la paire. Elle est calculée dans quatre modèles microcristallins qui supposent que les cristaux prennent toutes les orientations possibles, mais qui négligent la substance entre ces cristaux. Le modèle d'assemblage aléatoire dense utilisé est un modèle « relaxé » où les positions de quelques atomes ont été ajustées pour détendre les liaisons. La fonction expérimentale est celle d'un alliage ferreux amorphe. L'accord avec les résultats expérimentaux est meilleur dans le cas du modèle d'assemblage aléatoire dense que dans le cas des modèles microcristallins. Les données expérimentales et les courbes théoriques sont dues à T. Ichikawa.

tallin. Un verre au silicate se fracture lorsqu'il est soumis à des forces trop grandes; un métal cristallin répond par un mouvement des défauts le long de plans de glissement définis cristallographiquement, ce qui entraîne une augmentation de sa résistance à des déformations ultérieures. Quand un métal amorphe est déformé par tension, il réagit par cisaillement le long de bandes inclinées d'un angle de 45 degrés environ par rapport à l'axe de tension. Il n'y a pas d'effet de consolidation. On a déjà observé des propriétés mécaniques semblables dans certains verres polymères.

La fragilité des verres au silicate est une conséquence de la structure chimique qui les maintient dans l'état amorphe. Comme les forces entre atomes ont des directions privilégiées, la contrainte ne peut être relaxée que par rupture des liaisons. Au contraire, dans un verre métallique les liaisons sont peu directionnelles et permettent de petits déplacements des atomes en réponse à la force appliquée; la substance peut se déformer plastiquement, sans se casser.

Dans les métaux polycristallins, les joints de grains et les hétérogénéités chimiques sont souvent les sites privi-

légiés pour des attaques chimiques. Il semble actuellement prouvé que la structure des alliages vitreux soit remarquablement homogène sur toute distance supérieure à quelques diamètres atomiques. Cette uniformité de structure incite à penser que les verres métalliques devraient montrer une résistance à la corrosion inhabituelle. Plusieurs chercheurs ont effectivement mis en évidence une grande résistance à la corrosion pour des verres formés d'alliages — métaux de transition — métalloïdes contenant du chrome.

La résistance mécanique, la ductilité et la résistance à la corrosion sont des propriétés très intéressantes, surtout lorsqu'elles sont réunies dans le même métal. On peut envisager des applications où ces qualités seraient exploitées. Qui plus est, les propriétés mécaniques et chimiques qui rendent les verres métalliques faciles à usiner et de fabrication peu coûteuse accroissent leur intérêt, surtout pour les applications où leurs propriétés électriques et magnétiques caractéristiques sont exploitées.

Dans un métal, la résistance au passage d'un courant électrique est due aux irrégularités de l'arrangement périodique des atomes. Dans

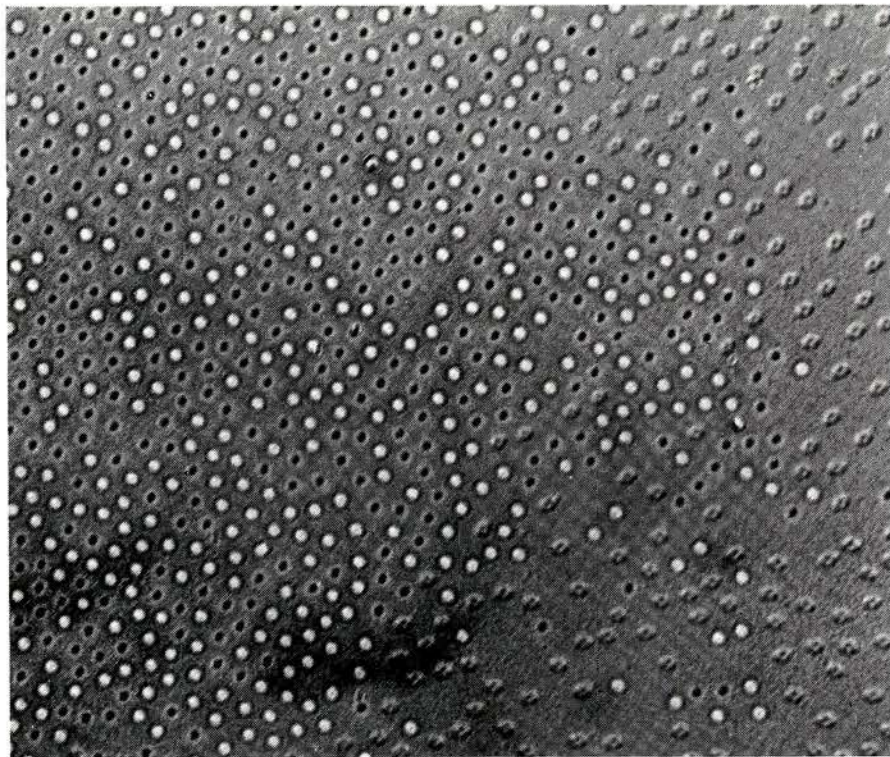
un métal cristallin, les deux principales causes de résistivité sont les vibrations thermiques et les impuretés: les vibrations thermiques induisent un désordre qui diminue lorsque la température décroît; les impuretés et les défauts structuraux ont une contribution pratiquement indépendante de la température. La somme de ces deux contributions fait que la résistivité décroît lorsque le métal est refroidi et approche d'une valeur minimale constante au zéro absolu.

Puisque les métaux amorphes sont par structure complètement désordonnés, leur résistivité est forte, typiquement dix fois plus grande que celle du même alliage à l'état cristallin. De plus, la contribution due au désordre structural et aux impuretés domine nettement la contribution due au mouvement thermique. Il s'ensuit que la résistivité n'est pas très sensible à la température: le coefficient de température de la résistivité est petit. On peut même s'arranger, en faisant varier la composition, pour que ce coefficient soit nul ou négatif à la température ambiante.

La stabilité de la résistivité des alliages vitreux en dépit des variations de température suggèrent de les utiliser comme étalons de résistance ou comme magnétorésistance, dans des détecteurs de champs magnétiques, par exemple dans les mémoires à bulles magnétiques. Le principe de fonctionnement d'un détecteur à magnétorésistance est fondé sur le fait que des variations d'un champ magnétique induisent de petites variations de la résistivité d'un métal. Évidemment toute variation supplémentaire de la résistivité due à un changement de température a tendance à brouiller le signal.

Un autre type de sondes de mesure des champs magnétiques, fondé sur l'effet Hall extraordinaire, pourrait utiliser les alliages amorphes. Quand un courant électrique parcourt un film mince, l'application d'un champ magnétique induit une différence de potentiel perpendiculaire au courant et au champ. Dans les matériaux ferromagnétiques, cet effet est appelé extraordinaire car la différence de potentiel est très supérieure à ce qu'elle est dans les autres métaux. Des films ferromagnétiques amorphes permettraient des différences de potentiel d'effet Hall encore plus grandes. La différence de potentiel est proportionnelle au carré de la résistivité et devrait donc être cent fois plus grande dans un alliage amorphe que dans un film cristallin de la même composition.

Pour le moment, les applications les plus prometteuses des verres métalliques sont celles qui utilisent leurs propriétés magnétiques inhabituelles. Les matériaux cristallins ont généralement un axe d'aimantation privilégié, et changer la direction de cette aimantation nécessite de



10. LES BULLES MAGNETIQUES d'un alliage amorphe peuvent être utilisées pour stocker l'information dans des mémoires d'ordinateur. Les bulles sont des domaines de magnétisation inverse d'un film de verre métallique qui ont été magnétisés le long d'un axe perpendiculaire au plan du film. Ils sont visibles ici sur une micrographie obtenue par Sigrid Herd et l'un des auteurs (P. Chaudhari) par microscopie électronique en transmission. Certaines bulles apparaissent claires avec un bord foncé, d'autres foncées avec un bord clair, d'autres encore claires d'un côté et foncées de l'autre, si bien qu'elles ont l'apparence de trous ou de bosses. En fait, ces trois types de bulles ne diffèrent que par la topologie de la région de transition où le champ magnétique tourne d'une polarité normale à une polarité inverse. Chaque bulle a un diamètre d'environ un dixième de micromètre, cinq fois plus petit que les plus petites bulles qu'on puisse faire dans une substance cristalline comme le grenat synthétique. Ainsi, une mémoire à bulles magnétiques dont le support est amorphe peut contenir, à surface égale, 25 fois plus d'information.

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION POUR LA SCIENCE

Ces numéros sont encore disponibles

- Numéro 1 :** Le Paradoxe de Stein. L'héraldique nouvelle.
Numéro 2 : La solution du problème des quatre couleurs. Les débuts de l'âge de fer.
Numéro 3 : Les chats et les échanges commerciaux. La vie sur Mars. L'irrigation au goutte-à-goutte.
Numéro 4 : L'architecture gothique. La perception des couleurs. L'épidémiologie de la grippe.
Numéro 5 : Comment collent les bactéries. Le problème du gaz carbonique. La structure du milieu interstellaire.
Numéro 6 : L'architecture iranienne. Les plantes carnivores. La supergravité.
Numéro 8 : Les galaxies elliptiques et l'évolution des galaxies. La chirurgie des microvaisseaux du cerveau.
Numéro 9 : Les techniques hydrauliques des Romains. La théorie des nœuds. Le rayonnement cosmologique.
Numéro 11 : Le Kiwi. Les applications des membranes synthétiques. L'ordinateur joue au poker.
Numéro 12 : Les Hominidés du Turkana oriental. Les organismes qui utilisent les courants d'air et d'eau. Paul Bert.
Numéro 14 : Le grand théorème de Fermat. Les fonctions cérébrales et la circulation sanguine.
Numéro 15 : Le retournement de la sphère. Le système cérébral de satisfaction. Des amas riches en galaxies.
Numéro 16 : Le mariage et la natalité dans les pays industrialisés. Les pistes d'athlétisme.
Numéro 17 : La production de charbon dans le monde. Les ophiolites. Le piano.
Numéro 18 : L'influence du stéthoscope en médecine. Les solitons. L'évolution du monde sonore animal.
Numéro 19 : Balistes et catapultes de l'Antiquité. Le spectre de l'hydrogène atomique. Les dauphins.
Numéro 20 : Les suites aléatoires et les démonstrations mathématiques. La vie dans l'eau et dans l'air.
Numéro 21 : La comète de Halley vue par Giotto. La thermorégulation du cerveau chez les mammifères.
Numéro 22 : L'histoire de l'Atlantique. La fécondation externe. Une mine de silex au néolithique.
Numéro 23 : L'avion des Frères Wright. Les dinosaures. La guerre nucléaire.
Numéro 24 : Les coraux. Les manipulations génétiques. La cryptographie.
Numéro 25 : Le cerveau.
Numéro 26 : La photosynthèse. Les pluies acides. Les truffes.
Numéro 27 : Les bousiers. Les Pyrénées. Théorie quantique et réalité.



COFFRETS RELIURES

pour classer vos numéros,

nous vous proposons ces coffrets-reliures
adaptés à un classement aisé et d'accès facile
(chaque coffret peut contenir six numéros).

Pour commander, utilisez le bon de commande, encart page 90

Comprendre le présent, choisir le futur.



LA DÉRIVE DES CONTINENTS (LA TECTONIQUE DES PLAQUES)

Les océans s'ouvrent, les continents dérivent, les montagnes surgissent. Contrairement aux idées anciennes, la surface du Globe est en perpétuelle évolution. Pressentie par Wegener au début du siècle, cette découverte a bouleversé les Sciences de la Terre depuis 20 ans. Cet ouvrage nous permet aujourd'hui de faire le point et de suivre les transformations du visage de notre planète.

BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Commencez sans délai
une collection qui fera date.

Bon de commande :
encart page 89

l'énergie. De nombreux verres métalliques semblent au contraire magnétiquement isotropes. Il n'y a pas d'axe d'aimantation privilégié et on peut donc faire tourner cette aimantation sans dépenser beaucoup d'énergie. Dans le cœur d'un transformateur électrique, l'aimantation change de sens avec le courant alternatif, c'est-à-dire cent fois par seconde en Europe. La perte d'énergie associée à ces inversions du champ peut être considérable. Il a été démontré que les matériaux magnétiques amorphes ont une efficacité au moins égale à celle des meilleurs alliages cristallins et ils pourraient même devenir meilleurs. Les verres magnétiques sont généralement des alliages de fer et de diverses quantités de bore, de carbone ou de silicium; leur efficacité semble être limitée par l'anisotropie magnétique introduite par des contraintes élastiques lors de la fabrication.

La « souplesse » magnétique et la haute résistivité des alliages vitreux en font des candidats pour la fabrication de têtes de lecture et d'enregistrement de magnétophones et de mémoires à disques magnétiques. La fréquence à laquelle les champs doivent s'inverser dans de tels appareils est de l'ordre de plusieurs milliers de hertz et les pertes peuvent, là encore, être réduites par l'utilisation de tels alliages. Dans ce cas, l'intérêt n'est pas bien sûr l'économie d'énergie (faible) mais la possibilité d'extraire au mieux le signal.

Dans une autre application des films de métaux amorphes, les mémoires à bulles magnétiques, l'isotropie naturelle de la substance est un handicap sérieux. Les bulles magnétiques sont des domaines magnétiques cylindriques qu'on peut créer dans un film mince, et dont l'axe d'aimantation privilégié est perpendiculaire au film. Si la matrice du film est aimantée pôle Nord vers le haut, chaque bulle forme un domaine isolé où le pôle Nord est vers le bas. La présence ou l'absence d'une bulle représente une unité d'information. Dans les mémoires à bulles magnétiques utilisées actuellement, les bulles ont un diamètre supérieur à un micromètre. Les plus petites bulles jamais observées dans un solide cristallin ont une taille d'environ un demi-micromètre.

Le matériau habituel des mémoires à bulles magnétiques est un monocristal de grenat synthétique. La découverte selon laquelle on pouvait aussi créer des bulles dans des films minces d'alliage amorphe de terres rares et de métaux de transition provoqua une surprise considérable. Cette découverte de J. Cuomo, R. Gambino et l'un de nous (P. Chaudhari) était surprenante car les bulles ne se forment qu'en présence d'une anisotropie magnétique généralement absente dans les verres métalliques. On a montré depuis qu'on

pouvait induire une telle anisotropie en appliquant un champ ou une force anisotrope à une température suffisamment élevée pour permettre un réarrangement local des atomes.

Les plus petites bulles observées dans les films amorphes sont beaucoup plus petites que celles présentes dans le grenat : environ un dixième de micromètre. Cette réduction d'un facteur cinq du diamètre d'une bulle permet en principe de stocker des informations avec une densité 25 fois supérieure. De plus, on peut déposer les films sur des substrats variés et leur donner la longueur que l'on désire. Pour toutes ces raisons, des mémoires à bulles magnétiques fabriquées à partir de verres métalliques devraient être bien meilleur marché à quantité égale d'informations utilisables.

Des supraconducteurs amorphes

On doit mentionner une dernière classe d'applications possibles. Bien que la plupart des verres métalliques aient une grande résistivité électrique, certains d'entre eux peuvent néanmoins devenir supraconducteurs, leur résistance s'annulant à des températures proches du zéro absolu. Ceci est dû au fait que le mécanisme de conduction ordinaire est assez différent du mécanisme de supraconductibilité. La haute résistivité normale du matériau amorphe a néanmoins une influence sur les propriétés de l'alliage supraconducteur. Quand un matériau devient supraconducteur, il existe encore des régions de conductivité normale : les vortex (tourbillons). La taille de ces vortex dépend en partie de la résistivité du matériau et les métaux amorphes présentent des tourbillons extraordinairement petits, de l'ordre de cinq à dix millièmes de micromètres. De plus, dans les substances amorphes, les vortex peuvent être exceptionnellement mobiles : en effet dans les solides cristallins les vortex ont tendance à se fixer aux joints des grains, et de tels joints n'existent pas dans un verre.

La petite taille des vortex pourrait rendre les supraconducteurs amorphes exceptionnellement peu sensibles aux champs magnétiques. Il existe pour tout supraconducteur une intensité critique de champ magnétique où la substance perd ses propriétés supraconductrices et redevient normale. On s'attend à ce que ce champ critique soit plus élevé dans le cas d'un supraconducteur amorphe que dans le cas d'un supraconducteur cristallin. Pour cette raison, les alliages sont peut-être les matériaux qui conviennent le mieux à la fabrication d'aimants supraconducteurs. La mobilité des vortex est ici un inconvénient puisque cette mobilité dissipe de l'énergie. On devrait sans doute les



11. LA TREMPE RAPIDE d'un alliage en fusion amène le métal dans un état vitreux, c'est-à-dire amorphe. Le métal, un alliage ferreux, est fondu dans un tube de quartz par des courants haute fréquence induits par la bobine à gauche de la figure. On applique alors une pression et le métal jaillit à travers une petite ouverture et se dépose sur la surface d'un cylindre en cuivre qui tourne à 3 000 tours par minute environ. Le

métal est aplati en un film de quelques centièmes de millimètres d'épaisseur, se solidifie en moins d'une milliseconde et se détache du rotor. Le ruban de verre métallique est la traînée jaune vif; les étincelles sont des fragments ou des gouttelettes de métal éjectés du rotor en rotation. La photographie a été prise par Fritz Goro dans le laboratoire d'un des auteurs (Praveen Chaudhari).

fixer, en cristallisant partiellement le film ou en y introduisant des inhomogénéités d'une autre façon.

La grande mobilité des vortex serait essentielle pour une autre application des verres supraconducteurs. De même que l'information peut être représentée par un réseau de bulles magnétiques, elle peut aussi être stockée sous formes de vortex dans un film supraconducteur. On peut alors envisager une nouvelle technologie

des mémoires d'ordinateur. Comme les vortex sont au moins dix fois plus petits que les bulles magnétiques la quantité d'informations stockables par unité de surface pourrait être plus de 100 fois supérieure.

Les verres métalliques n'ont pas une composition chimique spéciale; dans la plupart des cas, les atomes présents et leurs concentrations respectives n'ont rien d'extraordinaire. Ce qui différencie ces métaux de

tous les autres, c'est la façon dont ces atomes sont arrangés et reliés les uns aux autres. Cette différence exclusivement géométrique et topologique peut avoir une influence déterminante sur les propriétés de la substance. Bien qu'on ne comprenne pas encore parfaitement la nature exacte de l'arrangement atomique, on en sait suffisamment pour envisager maintenant l'exploitation de toutes ces propriétés inhabituelles. ■

Des bactéries recombinantes pour fabriquer des protéines utiles

Les bactéries dans lesquelles on introduit des gènes non bactériens peuvent fabriquer des protéines non bactériennes. Parmi les protéines synthétisées par recombinaison génétique figurent l'insuline et l'interféron.

par Walter Gilbert et Lydia Villa-Komaroff

Une cellule vivante est une fabrique de protéines. Elle synthétise les enzymes et les autres protéines qui maintiennent son intégrité et son fonctionnement physiologiques; en outre, dans les organismes multicellulaires, elle synthétise et sécrète souvent d'autres protéines; celles-ci assurent certaines fonctions spécialisées qui participent à la vie de l'organisme dans son ensemble. Les différents types de cellules fabriquent des protéines différentes, selon les instructions codées dans l'ADN de leurs gènes. Les derniers progrès de la biologie moléculaire nous donnent la possibilité de modifier ces instructions dans la cellule bactérienne et de créer ainsi des bactéries capables de synthétiser des protéines non bactériennes. Ces bactéries sont dites « recombinantes ». Outre leurs propres gènes, elles contiennent tout ou partie d'un gène de cellule animale ou humaine. Si le gène intégré est celui d'une protéine ayant une grande utilité dans le domaine médical, la culture de ces bactéries recombinantes sera un bon moyen pour produire industriellement cette protéine; cette culture est facile à réaliser et peu coûteuse.

De nombreux laboratoires, dans les universités et dans une industrie nouvelle de « génétique appliquée », travaillent à la création de bactéries capables de synthétiser de telles protéines non bactériennes. Grâce à un ensemble de techniques de « génie génétique » qui ne cesse de se développer, il devient possible d'isoler un gène particulier parmi le million de gènes que peut contenir une cellule animale, puis de faire fusionner ce gène avec un morceau de gène bactérien et d'intégrer les deux gènes combinés dans des bactéries. Lorsque ces bactéries se multiplient, elles font des millions de copies de leurs propres gènes et du gène animal qu'on

a intégré parmi eux. Si le gène animal est fusionné à un gène bactérien de telle manière que la bactérie puisse le traiter comme l'un des siens, cette bactérie va produire la protéine spécifiée par ce gène. Il est maintenant facile de connaître la structure détaillée de ces gènes « clonés » grâce à de nouvelles méthodes qui permettent de déterminer aisément et rapidement la séquence exacte des groupements chimiques de la molécule d'ADN. Lorsque cette structure est connue, on peut la retoucher pour composer des structures d'ADN plus efficaces dans le contexte bactérien.

Dans cet article, nous allons d'abord décrire certaines de ces techniques sur un plan général, puis nous exposerons comment, avec nos collègues Argiris Efstratiadis, Stephanie Broome, Peter Lomedico et Richard Tizard, nous les avons appliquées dans notre laboratoire, à Harvard, d'abord pour recopier un gène de rat codant pour une hormone, l'insuline, puis pour intégrer ce gène dans des bactéries et, enfin, pour faire fabriquer à ces bactéries un précurseur de l'insuline. Appliquant également cette technologie, Charles Weissmann et ses collègues de l'Université de Zurich ont récemment construit des bactéries qui produisent de l'interféron humain, une protéine antivirale qui semble être un outil thérapeutique prometteur.

ADN, ARN et protéines

Pour fabriquer des protéines, les cellules traduisent une série d'instructions réparties le long d'un brin d'ADN. Cette information héréditaire est donnée par l'ordre d'enchaînement de quatre groupes chimiques sur l'ADN : les bases adénine, thymine, guanine et cytosine. Ces bases, assemblées par groupes de trois sur l'ADN, déterminent les acides aminés

qui seront utilisés comme maillons élémentaires pour l'assemblage de la protéine; la correspondance entre chaque triplet de bases et un acide aminé particulier est appelée le code génétique. La partie d'une molécule d'ADN qui contient l'information pour la structure d'une protéine est appelée un gène de structure.

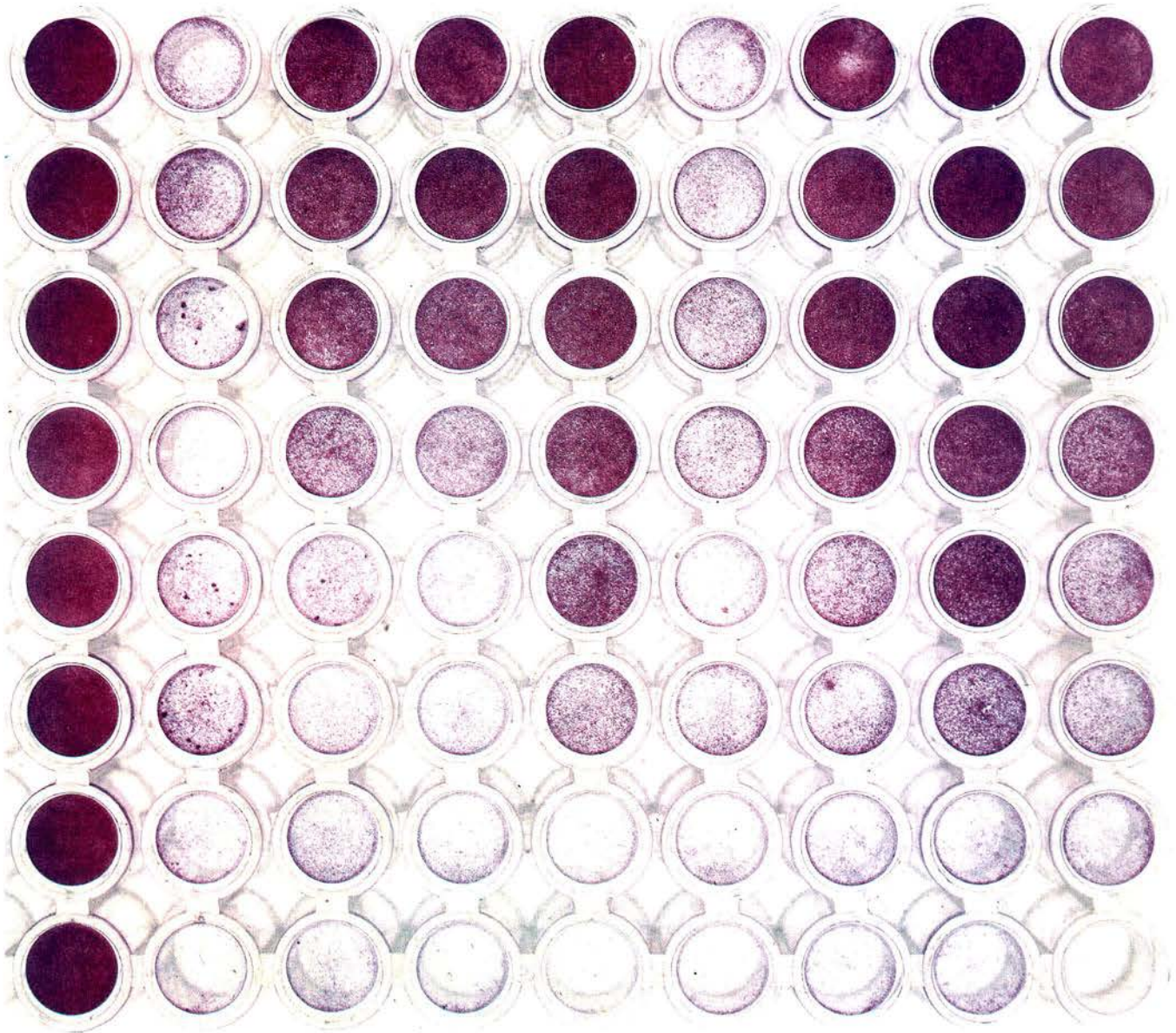
Pour mettre cette information en action, la cellule va recopier des séquences de bases de sa réserve génétique en ADN et former ainsi une nouvelle sorte de molécules : les ARN messagers. Un brin d'ADN sert de matrice pour l'assemblage d'un brin complémentaire d'ARN, selon les règles d'appariement des bases : l'adénine s'apparie toujours avec l'uracile (dans l'ARN l'uracile remplace la thymine de l'ADN) et la guanine s'apparie avec la cytosine. Dans les cellules animales, la transcription a lieu dans le noyau. Puis les molécules d'ARN messenger portent l'information du noyau au cytoplasme, où une machinerie moléculaire complexe la traduit en protéine par assemblage des acides aminés appropriés. Chez les bactéries, qui n'ont pas de noyau, la transcription et la traduction ont lieu simultanément : l'ARN messenger sert de support temporaire des instructions. Ce sont les messagers présents dans la cellule qui déterminent à chaque instant les protéines qui sont produites; pour fabriquer une protéine différente, la cellule synthétise un nouveau messenger à partir du gène de structure correspondant. L'ADN de chaque cellule contient la totalité de l'information requise par n'importe quelle cellule à n'importe quel moment, mais chaque cellule n'« exprime », c'est-à-dire ne traduit en protéine, qu'une partie réduite et spécifique de cette information. Comment la cellule sait-elle quels gènes de structure exprimer?

En même temps que l'information

structurale, une molécule d'ADN porte une série de signaux de régulation également codifiés par des séquences de bases. Les plus simples de ces signaux donnent les ordres « départ » et « arrêt », soit pour l'étape de transcription, soit pour celle de traduction. Des instructions plus com-

pliquées déterminent à quel moment et dans quel type de cellule un gène donné doit être utilisé. Le code génétique est le même dans tous les noyaux cellulaires et la séquence d'un gène de structure spécifie la même protéine dans tous les organismes; mais les instructions spéciales

ne sont pas les mêmes dans les bactéries et dans les cellules animales. L'une des différences les plus étonnantes n'a été découverte que ces deux dernières années: l'information codant pour les protéines bactériennes est portée par un segment d'ADN d'un seul tenant, alors que



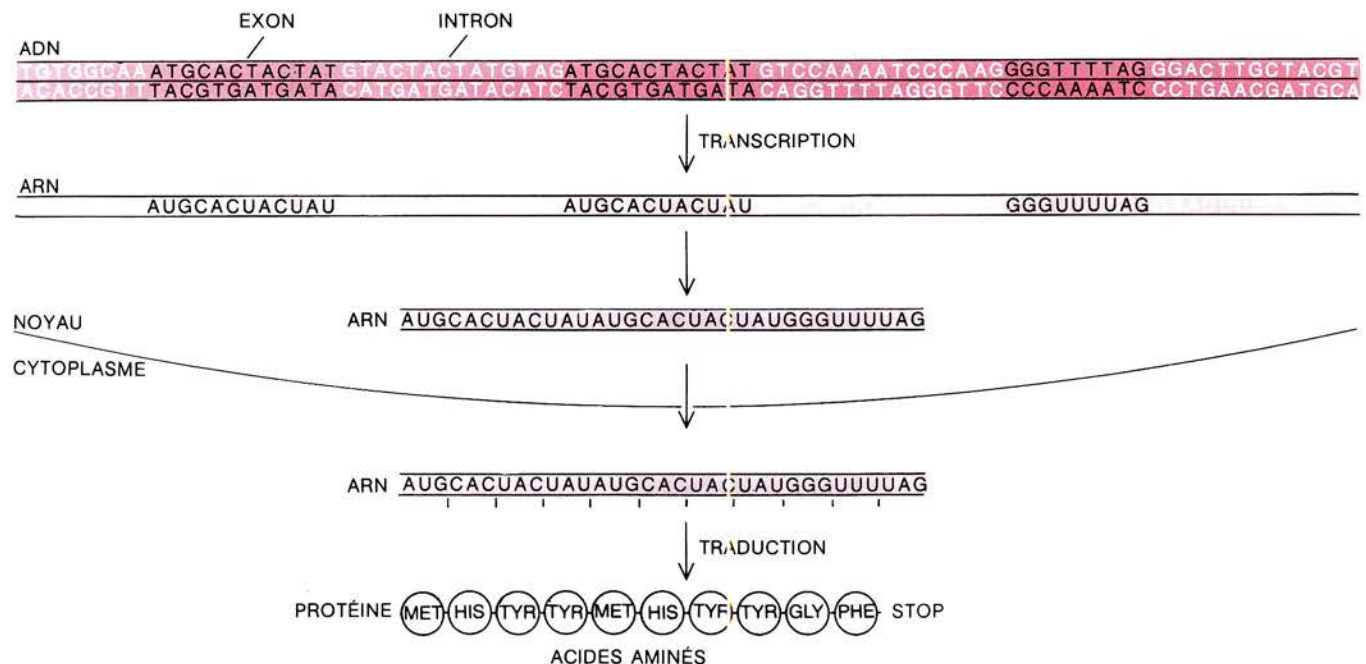
1. L'INTERFERON HUMAIN synthétisé dans les bactéries est capable, comme le montre ce test biologique, de bloquer une infection virale. On a obtenu, à partir de globules blancs humains, l'information nécessaire à la fabrication de l'interféron; cette information, sous forme de molécules d'ARN messager, a ensuite servi de matrice pour synthétiser des copies d'ADN double brin. Ces copies ont à leur tour été intégrées par des techniques de recombinaison génétique dans une souche de laboratoire de la bactérie *Escherichia coli*; ce sont ces bactéries qui ont synthétisé la protéine. Pour le test biologique, on a placé dans certaines cupules d'une plaque de plastique transparent des dilutions d'un extrait de bactéries; les autres cupules servaient de témoins. (Sur cette photographie, on voit les cupules par transparence à travers le fond de la plaque.) On a ajouté dans les cupules des cellules humaines qui se sont multipliées jusqu'à former une couche recouvrant le fond de chaque cupule. On a ensuite ajouté une préparation de virus à ces cellules; 24 heures plus tard, on les a colorées. Aux endroits où l'interféron protégeait les cellules contre le virus, elles ont survécu et se sont colorées. Aux endroits où il n'y avait pas d'interféron, le virus a tué les cellules et celles-ci n'ont pas retenu le colorant. Les cupules témoins de la colonne de gauche contiennent des cellules qui n'ont pas été

exposées au virus; elles apparaissent donc colorées. Les témoins de la deuxième colonne contiennent des cellules qui ont été tuées par le virus; elles sont pâles ou transparentes. Les témoins de la troisième colonne renferment des dilutions d'un échantillon de référence contenant de l'interféron obtenu directement à partir de cellules humaines; c'est la cupule supérieure qui contient le plus d'interféron et les suivantes en ont trois fois moins que celle qui se trouve au-dessus d'elles. Les cupules des six colonnes suivantes renferment des dilutions d'extraits bactériens de six colonies différentes d'*E. coli* qui contenaient de l'ADN d'interféron. Dans cinq colonnes sur six, on peut constater que l'interféron est présent et actif. Dans le troisième des extraits testés (colonne 6), les quantités d'interféron n'étaient pas détectables; le clone ne portait apparemment pas le gène complet. L'interféron est synthétisé par de nombreuses cellules animales, mais il est spécifique de l'espèce: seul l'interféron humain a une activité chez l'homme et jusqu'ici on n'a même pas pu en obtenir suffisamment pour pouvoir l'expérimenter de manière satisfaisante. Cette synthèse d'interféron humain par recombinaisons génétiques a été réalisée par Charles Weissmann et ses collègues à l'Université de Zurich en collaboration avec Kari Cantell de la Croix Rouge finlandaise.

chez les organismes plus compliqués, tels que les porcs et les hommes, l'information structurale est morcelée en plusieurs fragments, séparés entre eux par d'autres larges régions d'ADN qu'on appelle ADN intercalaire ou « introns ». Dans les cellules de ces organismes, une région souvent dix fois plus longue que ce qui est nécessaire à l'information structu-

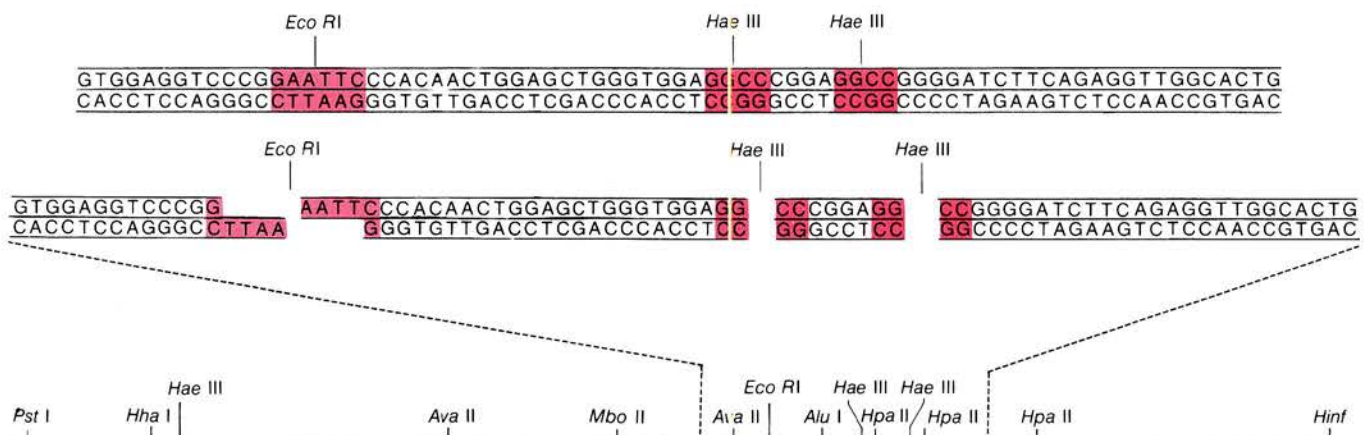
rale est transcrite en ARN. La cellule transforme ensuite cette longue molécule d'ARN en retranchant les séquences de bases qui ne codent pas pour la protéine et en joignant bout à bout les autres fragments en une molécule d'ARN messager définitive qui ne porte que la séquence structurale et les signaux de départ et d'arrêt nécessaires à la traduction.

Pour contraindre une bactérie à fabriquer une protéine non bactérienne, on doit lui incorporer une molécule d'ADN portant la séquence de bases qui spécifie les acides aminés de cette protéine, ainsi que les signaux bactériens nécessaires à la transcription et à la traduction. De plus, l'ADN intégré doit être reconnu comme sien par la bactérie



2. LES PROTEINES SONT SYNTHETISEES dans les cellules vivantes, selon les instructions codées par les gènes. Ces gènes consistent en des séquences spécifiques de groupements chimiques (les bases) alignés sur une molécule d'ADN double brin dans le noyau cellulaire. Le code génétique est « écrit » avec les quatre lettres *A*, *T*, *G* et *C*, qui représentent respectivement les quatre bases : adénine, thymine, guanine et cytosine. Le code est « lu » en mots de trois lettres, appelés codons, qui correspondent chacun à l'un des acides aminés liés ensemble dans la chaîne protéique. L'ordre d'enchaînement des bases peut aussi servir de support à des instructions de régulation. Dans les organismes multicellulaires, la séquence structurale, ou gène, qui code pour une protéine particulière est habituellement séparée en plusieurs

fragments par d'autres longues régions d'ADN; dans ce schéma, on a représenté par des lettres noires les fragments du gène, appelés exons, et par des lettres blanches les séquences intercalaires, appelées introns. L'information génétique est traduite en protéine par un processus indirect. La séquence complète des bases est d'abord transcrite à l'intérieur du noyau : à partir de l'ADN se forme une molécule d'ARN à brin unique. La transcription est régie par des règles d'appariement entre les bases : l'adénine s'apparie toujours avec l'uracile (*U*) et la guanine avec la cytosine. Ensuite, les parties de l'ARN messager formées par les copies des introns sont excisées et les parties restantes jointes bout à bout. Ce brin d'ARN messager quitte le noyau pour le cytoplasme où a lieu le processus de fabrication des protéines à proprement parler.



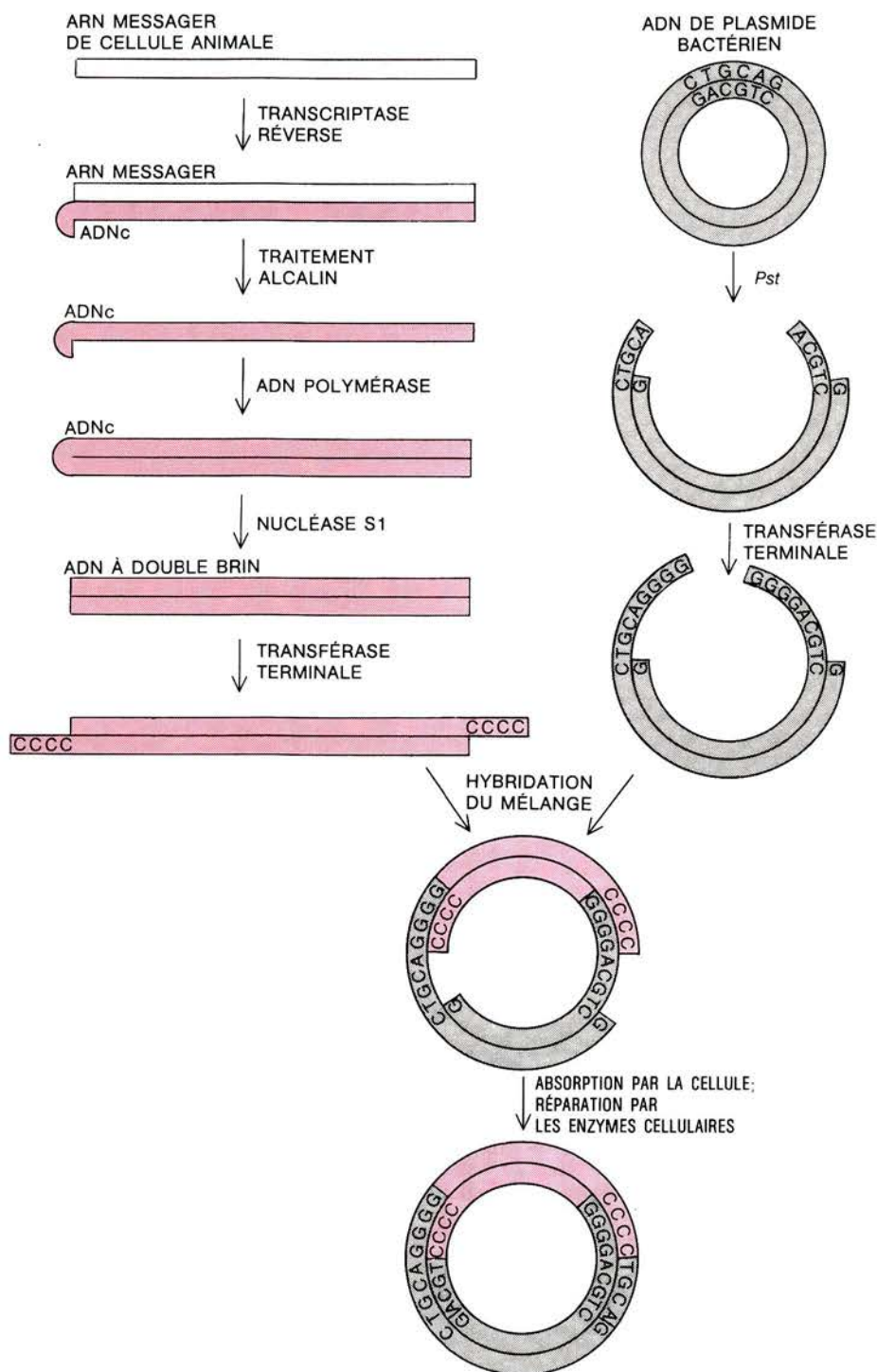
3. ON PEUT COUPER L'ADN en fragments relativement courts à l'aide d'endonucléases de restriction. Ces enzymes spéciales reconnaissent des séquences de bases spécifiques au niveau desquelles elles coupent la molécule en deux. Ainsi, par exemple *Eco RI*, la première de ces enzymes que l'on ait découverte, reconnaît une séquence de six bases et coupe la molécule chaque fois que cette séquence apparaît. *Hae III*, une autre enzyme de restriction, agit au niveau d'une séquence de quatre bases. Comme la probabilité de trouver une séquence donnée

de quatre bases est plus grande que celle de trouver une séquence de six bases, on s'attend à ce que *Hae III* coupe l'ADN plus souvent que *Eco RI*. De fait, sur le schéma du haut, qui correspond à une partie du gène codant pour l'insuline dans les cellules de rat, un site *Eco RI* et deux sites *Hae III* sont présents. Ce même ADN contient des sites de reconnaissance pour un certain nombre d'autres enzymes de restriction, comme le montre le schéma linéaire du bas qui représente un plus grand fragment du même gène.

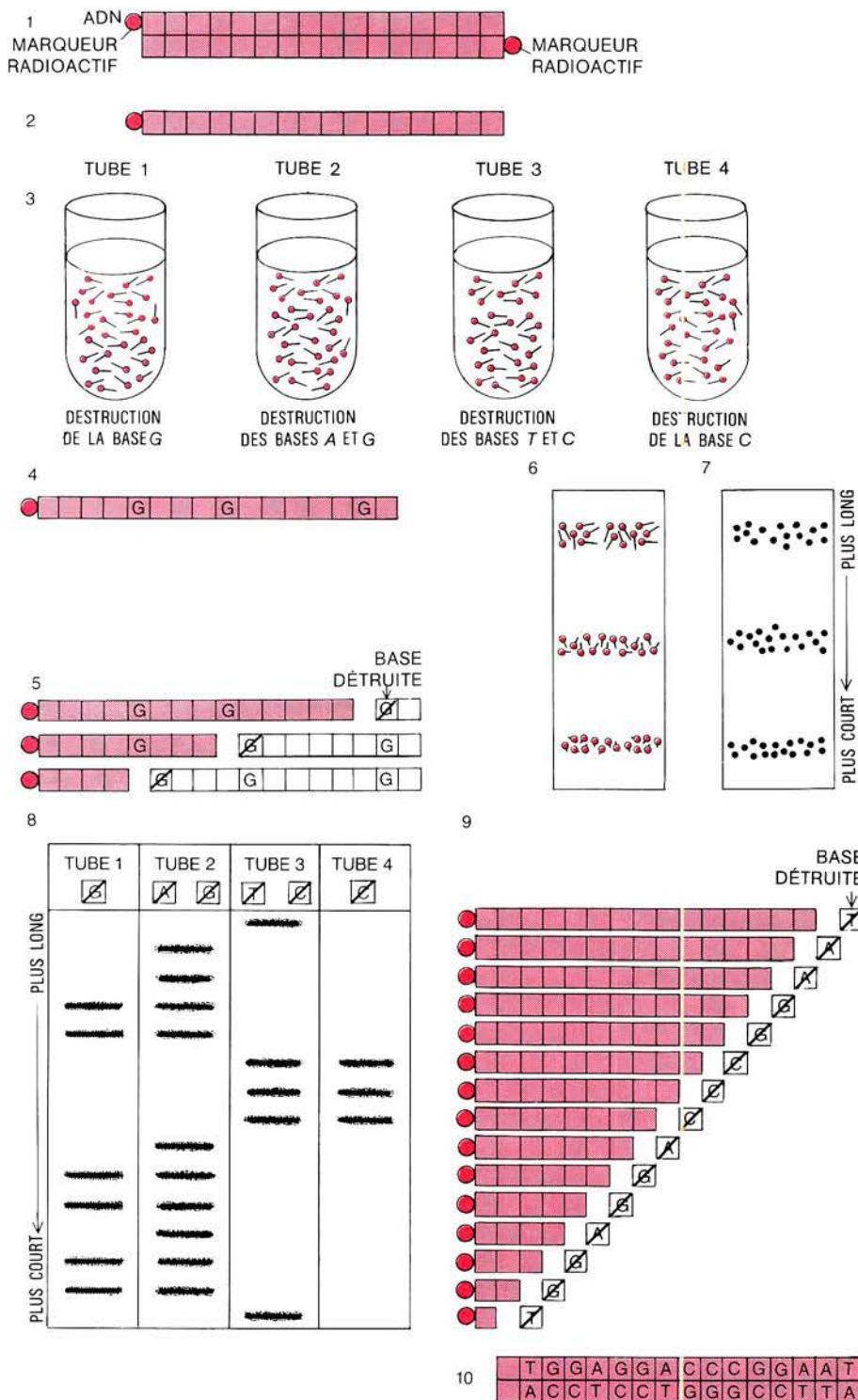
afin d'être dupliqué lorsque celle-ci se divise. Le problème est donc constitué de trois parties : trouver la bonne séquence structurale (par exemple celle de l'insuline), la placer dans la bactérie de manière qu'elle s'y maintienne pendant la croissance et la division cellulaire et enfin manipuler l'information environnante en modifiant les signaux de régulation pour que la séquence structurale soit exprimée en protéine. Une fois que la protéine est synthétisée, il peut encore s'avérer nécessaire d'apporter d'autres modifications au gène ou à la bactérie afin d'obtenir la protéine en quantité suffisante pour pouvoir l'utiliser.

On appelle clonage l'ensemble des techniques de recombinaison de l'ADN que l'on utilise pour placer et maintenir un gène nouveau dans une bactérie. Pris dans ce sens, ce terme signifie que l'on isole une séquence spécifique d'ADN que l'on introduit dans un organisme unique; celui-ci ensuite prolifère pour former une population de descendants identiques appelée clone. Deux méthodes permettent d'effectuer cette opération. Dans un cas, le vecteur utilisé pour introduire le nouvel ADN dans la bactérie est un petit morceau d'ADN circulaire appelé plasmide. Les plasmides ne portent que quelques gènes; ils sont maintenus en plusieurs exemplaires dans chaque bactérie grâce à des fonctions géniques bactériennes; les plasmides restent séparés du corps principal des gènes bactériens, constitué d'un cercle d'ADN environ 1 000 fois plus grand. Dans l'autre méthode de clonage, on prend comme vecteur un virus qui se développe dans les bactéries. Ce type de virus possède habituellement de 10 à 50 gènes propres (une bactérie en contient plusieurs milliers), et l'on peut souvent remplacer certains de ces gènes par d'autres fragments d'ADN étrangers. Toutes les techniques que nous allons décrire peuvent s'appliquer aussi bien aux plasmides qu'aux virus.

Une molécule d'ADN ressemble à un fil très long et torsadé. Dans une bactérie, la molécule d'ADN, longue d'un millimètre, est formée d'un enchaînement continu d'environ trois millions de bases, repliées dans tous les sens à l'intérieur d'un espace dont le diamètre est inférieur à un micromètre (un millième de millimètre). Dans les cellules humaines, l'ADN est réparti dans 46 chromosomes qui contiennent chacun une molécule longue d'environ quatre centimètres, réalisant un total d'environ trois milliards de bases. Comment peut-on y retrouver le gène unique avec lequel on désire travailler et qui ne mesure que quelques milliers de bases? La nature a heureusement créé certaines enzymes (protéines qui dirigent des réactions chimiques) qui résolvent en partie ce problème. Ces enzymes,



4. LES TECHNIQUES DE RECOMBINAISON GENETIQUE permettant de faire fabriquer une protéine par des bactéries exigent l'insertion dans un plasmide du fragment d'ADN animal qui code pour cette protéine. Le plasmide est un petit anneau d'ADN bactérien qui sert de vecteur pour intégrer l'ADN étranger dans la bactérie. L'ADN du plasmide est clivé par l'enzyme de restriction appropriée et la nouvelle séquence d'ADN est insérée au moyen d'enzymes qui lient les extrémités de l'ADN rapporté à celles du plasmide ouvert : ici, on utilise tout d'abord la transcriptase réverse pour copier l'information génétique d'une molécule d'ARN messageur à brin unique en un ADNc également à brin unique. On détruit alors l'ARN messageur et on synthétise le brin complémentaire du brin d'ADN avec une autre enzyme, l'ADN polymérase. Une autre enzyme, la nucléase S1, sert à couper la liaison covalente entre les deux brins d'ADN. L'étape suivante consiste à joindre entre eux l'ADN double brin et le plasmide : par une transférase terminale, on allonge les extrémités du fragment d'ADN avec une courte séquence de bases identiques (dans le cas présent, quatre cytosines); puis on hybride cet ADN avec celui du plasmide, auquel on a ajouté la séquence de bases complémentaires (quatre guanines). Enfin, des enzymes bactériennes remplissent les brèches sur la molécule circulaire régénérée et referment la jonction entre l'ADN intégré et celui du plasmide. Le plasmide qu'ont utilisé les auteurs pour synthétiser la pro-insuline dans des bactéries, appelé *pBR 322*, a été clivé par l'enzyme de restriction *Pst* au niveau d'un site de reconnaissance situé au milieu du gène codant pour la pénicillinase (l'enzyme qui dégrade la pénicilline). L'ADN rajouté détruit cette activité enzymatique mais il reste la résistance à la tétracycline, qu'on peut utiliser pour sélectionner les bactéries contenant le plasmide.



5. L'ANALYSE DES SEQUENCES D'ADN, selon la méthode inventée par l'un des auteurs (W. Gilbert) et Allan Maxam, commence par l'attachement d'un marqueur radioactif à l'une des extrémités de chacun des brins de la molécule d'ADN (1). On sépare les brins de plusieurs milliards de molécules (2) et on répartit en quatre tubes une préparation contenant l'un des brins (3). Chaque tube contient un réactif chimique qui détruit sélectivement une ou deux des quatre bases A, T, G et C, cassant ainsi le brin d'ADN aux emplacements de ces bases. La réaction est conduite de telle manière qu'à chaque emplacement d'une base donnée, une partie seulement des brins est coupée par le réactif, ce qui donne naissance à un ensemble de fragments de tailles différentes. Par exemple, un brin contenant trois G (4) donnera un mélange de trois molécules marquées radioactivement (5). Les quatre réactions cassent l'ADN aux G seuls, aux G et aux A, aux T et aux C, et aux C seuls. Les molécules sont séparées en fonction de leur taille par électrophorèse sur gel; plus la molécule est courte, plus elle migre loin sur le gel (6). Le marqueur radioactif donne une image de chaque groupe de molécules sur un film pour rayons X (7). Lorsque l'on place les quatre films côte à côte (8), la succession des bandes, qui évoque les barreaux d'une échelle, représente les fragments de plus en plus courts obtenus à partir du brin d'ADN original (9). Sachant quelle base, ou quelle paire de bases, a été détruite pour produire ces fragments, on peut lire en partant d'en bas la séquence de base inscrite de gauche à droite (10); celle-ci donne à son tour la séquence du brin complémentaire.

appelées endonucléases de restriction, ont la capacité de passer en revue le fil d'ADN sur toute sa longueur pour repérer de courtes séquences particulières au niveau desquelles elles coupent la molécule en deux (voir figure 3). On connaît 40 à 50 de ces enzymes qui reconnaissent chacune une séquence différente; ainsi chaque enzyme de restriction morcelle n'importe quelle molécule d'ADN, de manière reproductible, en un ensemble caractéristique de petits fragments, longs de quelques centaines à quelques milliers de bases, que l'on peut isoler en fonction de leur taille.

On peut cloner ces fragments d'ADN dans les bactéries. Pour cela, on commence par purifier le cercle d'ADN du plasmide puis, à l'aide d'une des enzymes de restriction qui reconnaît un site unique, on ouvre le cercle du plasmide. Précisément à ce point d'ouverture, on intègre le fragment d'ADN choisi en utilisant toute une gamme de techniques enzymatiques qui lient les extrémités du fragment d'ADN à celles du cercle ouvert. Dans les conditions normales, la molécule d'ADN recombinant formée ne pourrait pas traverser la paroi bactérienne mais on peut toutefois perméabiliser la bactérie à l'aide d'une solution diluée de chlorure de calcium; dans un mélange de bactéries ainsi traitées et d'ADN, quelques bactéries vont alors capter le plasmide hybride. On peut retrouver ces bactéries parmi toutes les autres qui n'ont pas pris d'ADN, si l'un des gènes du plasmide apporte à la bactérie une propriété nécessaire à sa survie, comme par exemple la résistance à un antibiotique: les bactéries portant le plasmide pourront résister à l'antibiotique alors que toutes les autres seront tuées; et lorsque l'on étale le mélange de bactéries sur une boîte de gélose contenant des éléments nutritifs ainsi que l'antibiotique, chaque bactérie individuelle portant le plasmide donnera une colonie distincte d'environ cent millions de cellules. On peut choisir l'une de ces colonies et la mettre en culture de manière à produire des milliards de cellules contenant toutes des copies identiques de la nouvelle séquence d'ADN dans un plasmide recombinant (voir figure 6).

L'analyse des séquences de l'ADN

Les procédures que nous avons brièvement décrites précédemment peuvent être employées dans des expériences de clonage en « coup de fusil » (*shotgun*) de génomes entiers. On coupe l'ADN d'une cellule animale en des millions de morceaux et on intègre chacun d'eux dans une bactérie différente. On a réalisé de cette manière de nombreuses collec-

tions de tous les fragments d'ADN humain, de souris, de rat et de mouche. On peut déterminer la structure de n'importe lequel de ces ADN clonés; pour cela, on coupe le plasmide hybride par une enzyme de restriction, on sépare les fragments d'ADN ainsi formés, puis on détermine la séquence de chacun d'eux et, enfin, on assemble les séquences obtenues pour en déduire la structure complète de l'ADN cloné.

Il existe deux méthodes pour déterminer la séquence de l'ADN. Toutes deux s'appuient sur les points de référence créés par la coupure de l'ADN, au niveau des courtes séquences spécifiques reconnues par les enzymes de restriction, et établissent ensuite le reste de la séquence en mesurant la distance qui sépare chaque base de ces points. Pour cela on produit un ensemble de molécules marquées radioactivement qui s'étendent toutes du point commun (le site de clivage) jusqu'à l'un des emplacements d'une base donnée. Si on sépare ces molécules en fonction de leur taille, et si on les repère par leur radioactivité, la longueur de la plus courte de ces molécules donnera la distance du premier emplacement de la base choisie; les molécules plus longues donnent les emplacements suivants. La figure que donne ce type d'analyse ressemble à une échelle dont les barreaux indiquent la longueur des molécules. En comparant quatre de ces figures, on peut lire directement la séquence.

La première des deux techniques, inventée par Allan Maxam et l'un de nous (W. Gilbert), utilise des réactifs chimiques qui distinguent les propriétés chimiques différentes des bases et coupent l'ADN au niveau de l'une de ces bases. On doit, pour produire toutes les longueurs de fragments possibles, laisser les réactions s'effectuer pendant un temps assez bref; la molécule ne se casse alors qu'à certains des emplacements où se trouve la base sensible; on obtient ainsi des molécules de taille différente puisque les cassures ont eu lieu en des emplacements différents. On utilise quatre groupes de réactifs différents pour former les quatre figures possibles. Le marqueur radioactif est attaché à l'extrémité du fragment de restriction dont on veut obtenir la séquence, afin que seules soient repérées par leur radioactivité les molécules qui s'étendent de cette extrémité marquée jusqu'au point de clivage.

L'autre méthode d'analyse des séquences, inventée par Frederick Sanger, du laboratoire de Biologie moléculaire du Conseil britannique pour la Recherche médicale à Cambridge, consiste à synthétiser une copie de l'ADN avec une enzyme, et à stopper la réaction d'élongation en bloquant la progression de l'enzyme à l'emplacement d'une base donnée. Dans ce cas, le marqueur radioactif

est incorporé à la molécule synthétisée au cours de quatre réactions différentes. Les deux méthodes peuvent donner la séquence de 200 à 300 bases en une seule expérience. La séquence d'un des petits plasmides utilisés dans nos expériences de clonage a été obtenue en un an par Gregory Sutcliffe, qui a déterminé l'ordre des 4 357 bases sur l'un des brins, puis vérifié le résultat obtenu en élucidant la séquence du brin complémentaire.

N'importe quelle région d'ADN peut être isolée et sa séquence déterminée, après clonage dans un plasmide. Le plus difficile n'est pas d'analyser la séquence, mais plutôt d'obtenir les fragments d'ADN spécifiques dont on a besoin. Les techniques de recombinaisons génétiques fonctionnent pratiquement comme un microscope en isolant et en amplifiant, par multiplication des copies, une région d'ADN, mais il n'est pas possible d'examiner séparément un million de bactéries pour trouver le gène cherché. Le problème fondamental, qui n'a pas de solution générale, est donc de placer sélectivement dans la bactérie la séquence d'ADN voulue, c'est-à-dire le gène de structure voulu.

Sélectionner le bon gène

Pour de très petites protéines, il existe une approche directe. A partir de la séquence des acides aminés et en fonction du code génétique, on peut composer une séquence de bases qui spécifie ces acides aminés. On peut alors synthétiser chimiquement une molécule d'ADN correspondant à cette séquence. C'est exactement ce qu'ont fait Keiichi Itakura et ses collaborateurs au Centre médical de la Cité de l'Espoir à Duarte, en Californie. Ces chercheurs ont construit une séquence d'ADN de 42 bases qui codifie la structure de la somatostatine, une petite hormone constituée de 14 acides aminés. Cependant, plus le segment d'ADN est long et plus il est difficile à réaliser: la synthèse d'une molécule d'ADN longue de 100 bases est une opération extrêmement difficile. De nombreuses petites hormones sont formées de 50 à 100 acides aminés, et les enzymes et les autres protéines mesurent de 200 à plusieurs milliers d'acides aminés. En outre, on ignore la séquence de nombreuses protéines intéressantes. (En fait, la séquence d'acides aminés de certaines protéines n'a été reconstituée que par l'analyse de la séquence de leur ADN cloné.)

Le gène de structure que l'on cherche est évidemment présent quelque part dans l'ADN de la cellule animale. Le problème est de le trouver, mais même si cela était possible, l'information structurale serait interrompue (comme nous l'avons mentionné



● **Les jeux mathématiques d'Eurêka**
192 p., 15 x 21, cartonné.
253 casse-tête résolus.

● **Les casse-tête logiques de Baillif**
160 p., 15 x 21, cartonné.
111 problèmes résolus et
20 problèmes célèbres.
Casse-tête, paradoxes, découpages, pesées de pièces..., le livre de Jean-Claude Baillif aborde la plupart des aspects sous lesquels se présentent les jeux mathématiques et logiques du «bouffon du duc» à celui de «la chasse au tigre». Un chapitre réunit vingt casse-tête célèbres devenus de véritables classiques et qui sont résolus comme l'ensemble des problèmes proposés.

● **Les casse-tête mathématiques de Sam Loyd, par Martin Gardner**
368 p., 15 x 21, 260 dessins, cartonné.
Inventeur de problèmes d'échecs comme de jeux publicitaires, prestidigitateur, mime, ventriloque, Sam Loyd (1841-1911) est reconnu comme «le plus grand inventeur américain de divertissements mathématiques». Pleins d'humour, d'une présentation anecdotique ou cocasse, ces casse-tête ne demandent, pour être résolus, qu'astuce, bon sens et logique. L'ouvrage est illustré par les gravures de l'édition originale. Il s'adresse au grand public.

A paraître

Le carnaval de la physique de Walker
vient de connaître un succès considérable aux États-Unis.

Je désire recevoir une documentation gratuite sur ces ouvrages

Nom

Adresse

Dunod
17, rue Rémy-Dumoncel PS
75014 PARIS

dunod

plus haut) par d'autres larges régions d'ADN. Pourtant, cette information existe bien quelque part sous une forme continue : sur l'ARN messager. De plus, comme les différentes cellules se spécialisent dans la synthèse de protéines différentes, un tissu approprié contiendra l'ARN messager cherché en même temps que d'autres messagers qui codent pour les protéines communes à toutes les cellules. Par exemple, l'insuline est fabriquée par les cellules bêta du pancréas; ces cellules contiennent donc l'ARN messager de l'insuline alors que les autres cellules ne le contiennent pas, et ceci bien que le gène de l'insuline soit présent dans l'ADN de toutes les cellules.

Par conséquent, notre tâche consiste à prendre l'information structurale cherchée dans l'ARN messager de la cellule pour le convertir en ADN susceptible d'être cloné. Pour cela, on profite d'une enzyme particulière, la transcriptase reverse, qui copie un brin unique d'ARN en un brin complémentaire d'ADN. (Cette enzyme se trouve dans certains virus à ARN qui inversent le processus normal de transcription de l'ADN en ARN. Pour ces virus, c'est l'ARN et non l'ADN qui assure le transfert de l'information spécifique d'une cellule à l'autre, et, lorsqu'une nouvelle cellule a été infectée, l'ARN est reconverti en ADN à l'aide de la transcriptase reverse.) On prend cette copie d'ADN complémentaire, appelé ADNc, et on synthétise le brin opposé avec une enzyme à copier l'ADN, de nature plus couran-

te. Les fragments d'ADNc à double brin que l'on obtient sont un mélange de copies plus ou moins complètes, non seulement de l'ARN messager cherché, mais aussi de tous les autres messagers présents dans le tissu. Dans le meilleur des cas, seuls quelques-uns des fragments d'ADN vont contenir toute l'information structurale cherchée. Même dans ces fragments-là, les signaux de régulation qui entourent les séquences structurales se rapportent au système de traduction de la cellule animale et non à celui de la bactérie; et enfin, puisque l'ADN a été fait à partir d'ARN, il n'y aura aucune instruction pour la transcription. Ainsi, bien que l'on puisse cloner l'ADNc, deux problèmes subsistent : détecter les clones contenant le fragment d'ADN structural que l'on cherche, et fournir les signaux de régulation appropriés.

Trouver le bon clone

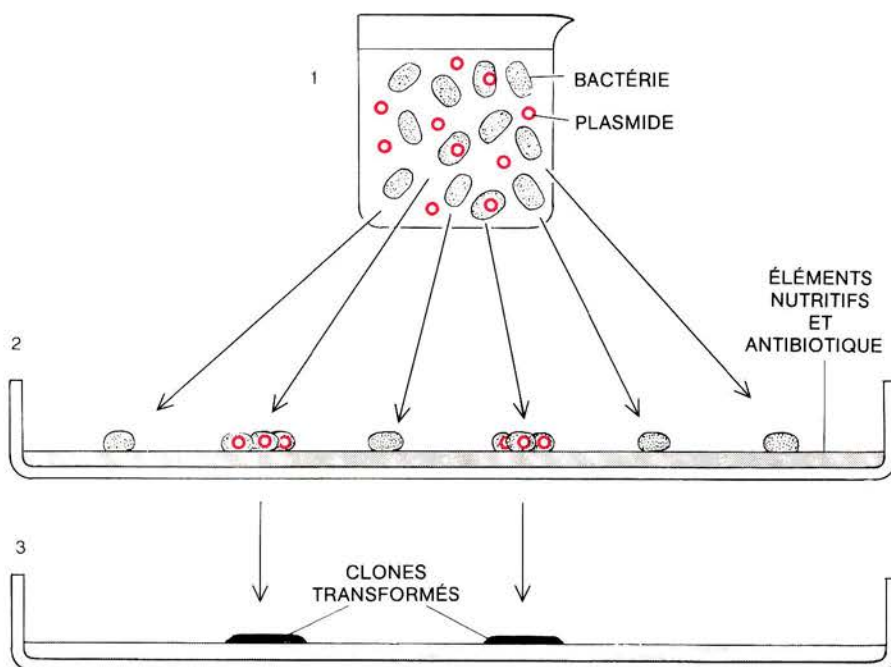
Il est aisé de trouver le clone cherché si l'on a commencé l'expérience avec un ARN messager pur. On peut détecter les séquences homologues par un processus appelé hybridation. Dans cette technique, on sépare les deux brins d'une molécule d'ADN par chauffage : on détruit les liaisons faibles qui maintenaient les deux brins ensemble sans briser les liaisons chimiques fortes qui enchaînent les bases le long de la molécule. Si l'on refroidit un tel mélange de brins, les séquences homologues vont

se retrouver. La première étape de ce processus est appelée la dénaturation et la seconde étape la renaturation. Un processus identique sert à mettre en évidence les homologues de séquence entre ARN et ADN.

On cultive des colonies bactériennes sur un disque de nitrate de cellulose, puis on fait éclater les cellules bactériennes là où elles se trouvent et on fixe sur la cellulose l'ADN qu'elles libèrent. Si cet ADN est dénaturé et renaturé en présence d'ARN messager radioactif, la radioactivité ne sera retenue que par les éléments des colonies qui contenaient un plasmide dont la séquence était homologue à celle du messager. Comme on garde toujours une réplique, c'est-à-dire un étalement de colonies vivantes à l'image du premier, on retrouve ainsi les bactéries contenant l'ADN cherché. On cultive ces bactéries pour constituer des quantités de matériel qui permettront d'identifier, par d'autres expériences d'hybridation, des clones contenant la même séquence dans des environnements différents et où la production de la protéine désirée est peut-être meilleure.

Si l'on ne peut pas purifier l'ARN messager spécifique de la séquence d'ADN étudiée, parce qu'il ne constitue qu'une petite fraction de l'ensemble des messagers de la cellule, d'autres moyens permettent de rechercher cette séquence d'ADN. On peut par exemple utiliser la surface de la protéine correspondante. Ces surfaces peuvent être reconnues par des protéines appelées anticorps. La production d'anticorps fait partie de la réaction de protection des animaux contre les substances étrangères. Si par exemple, on injecte de l'insuline humaine à un cochon d'Inde, ce cochon d'Inde va fabriquer des anticorps qui se lient à l'insuline humaine. Ces anticorps ne se lieront pas à l'insuline de cochon d'Inde parce qu'ils ne « voient » que les surfaces qui rendent la protéine humaine différente. Un anticorps purifié peut donc servir de réactif pour détecter une protéine particulière. (C'est là le mode d'action des vaccins : si l'on injecte un virus inactivé à un animal, ce dernier est stimulé pour fabriquer des anticorps dirigés contre les protéines virales. Les anticorps vont ensuite protéger l'animal contre l'infection par ce virus en se liant à la particule virale et en donnant ainsi aux autres cellules le signal d'éliminer l'envahisseur. Si la stimulation antérieure n'a pas eu lieu, la réaction à l'invasion virale est trop lente pour bloquer l'infection.)

Même si l'on n'a pas purifié un ARN messager spécifique, on peut faire fonctionner les molécules d'ARN dans un tube à essai en ajoutant la machinerie nécessaire à leur traduction en protéine (cette machinerie est obtenue à partir du cytoplasme



6. LES PLASMIDES RECOMBINANTS (en couleur) ayant inséré des gènes de protéines animales et le gène de résistance à la tétracycline sont mélangés à des bactéries (1) : certaines bactéries captent le plasmide. Puis on étale le mélange de bactéries sur un milieu de culture contenant l'antibiotique (2) : les cellules qui ont capté le plasmide sont résistantes à l'antibiotique alors que les autres sont tuées; les premières survivent, et chacune d'elles donne un clone, c'est-à-dire une colonie de cellules génétiquement identiques (3).

de cellules broyées), ainsi que des acides aminés radioactifs. Parmi les petites quantités de protéines radioactives que l'on synthétise de cette manière, il est possible, à l'aide d'anticorps, de reconnaître la protéine à laquelle on s'intéresse; c'est un moyen pour repérer un messager spécifique. Si l'on prend un plasmide recombinant et si on l'hybride au mélange d'ARN, seuls les ARN homologues à une séquence du plasmide vont s'hybrider avec lui et devenir par conséquent indisponibles pour la traduction; on détecte donc le plasmide auquel on s'intéresse par sa capacité de bloquer la synthèse de la protéine correspondante. On peut vérifier que cette identification est correcte par le fait que l'ARN lié à l'ADN peut être séparé des autres ARN puis libéré de l'ADN; il doit alors pouvoir fonctionner dans le système pour diriger la synthèse de la protéine dont il porte l'information.

Les signaux de régulation

Avec ces techniques, on peut cloner et identifier des fragments d'ADN portant l'information qui décide de la structure d'une protéine. Cette information va-t-elle fonctionner dans les bactéries?

Il faut apporter des signaux de régulation que la bactérie puisse utiliser. L'un d'eux est le signal de départ de la synthèse de l'ARN messager; dans les bactéries, c'est une région d'ADN immédiatement adjacente au fragment à transcrire en ARN. Le second signal important fait partie de l'ARN messager et indique à la machinerie de traduction bactérienne de « commencer ici ». Tous les gènes bactériens ont ces deux sortes de signaux de démarrage (dont certains fonctionnent mieux que d'autres). Ils ont aussi deux signaux d'arrêt, un pour la transcription et un pour la traduction. Un moyen simple de faire la séquence de la nouvelle protéine est d'ouvrir un gène bactérien en le coupant en son milieu par une enzyme de restriction et d'insérer le nouvel ADN à cet endroit. On obtient une protéine hybride qui débute comme une protéine bactérienne, puis se prolonge par l'enchaînement des acides aminés que l'on veut produire. C'est ainsi que l'on a fait fonctionner dans les bactéries le gène de la somatostatine, qui avait été synthétisé par voie chimique. L'ADN qui code pour ces 14 acides aminés, suivi d'un signal d'arrêt, fut inséré près de l'extrémité d'une région codant pour une protéine de 1 000 acides aminés. Après que la bactérie eut fabriqué la protéine hybride, on excisa chimiquement la somatostatine et on la purifia.

Le gène bactérien peut non seulement apporter les signaux de régulation, mais aussi doter la protéine

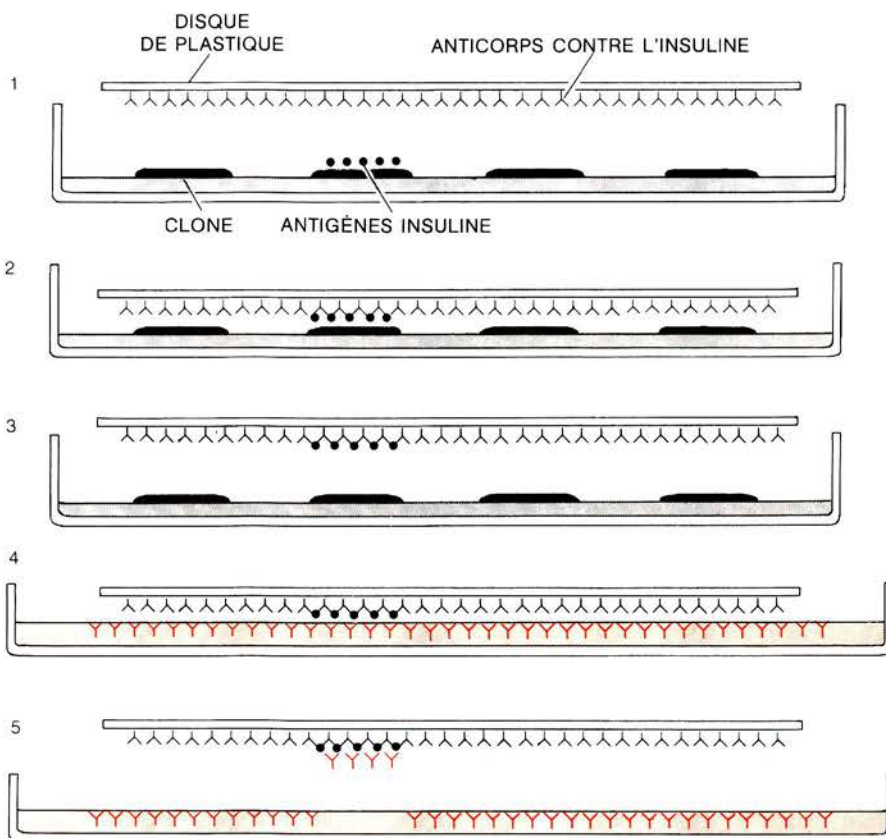
hybride de nouvelles propriétés utilisables. Par exemple, peu de protéines bactériennes sont sécrétées à travers la membrane qui entoure la bactérie. Or si l'on insère l'ADN animal dans le gène codant pour une de ces protéines, la partie bactérienne de la protéine hybride servira de vecteur pour faire passer la protéine nouvelle à travers la membrane, de sorte qu'on pourra la mettre en évidence et la purifier plus facilement.

Nous avons exploité toutes les techniques décrites précédemment pour obtenir une copie du gène de l'insuline et pour l'insérer dans des bactéries afin de fabriquer de la pro-insuline. L'insuline est une hormone de petite taille: deux courtes chaînes, l'une de 20 et l'autre de 30 acides aminés. Initialement, ces deux chaînes se trouvent à l'intérieur d'une chaîne plus longue de 109 acides aminés que l'on appelle la pré-pro-insuline. Quand la pré-pro-insuline est synthétisée dans les cellules bêta du pancréas, les 23 premiers acides aminés de la chaîne servent de signal pour assurer le passage de la molécule à travers la membrane cellulaire. Pendant le transfert, ces acides aminés sont éliminés par clivage, laissant

une chaîne de 86 acides aminés: la pro-insuline. La pro-insuline se replie pour rapprocher les régions terminales de la chaîne; puis la région centrale est découpée par des enzymes, et il reste l'insuline. Le rôle de la région centrale est d'aligner correctement les deux chaînes qui constituent l'insuline. Si, par la suite, les deux chaînes sont séparées, il sera difficile de les réassembler et elles ne fonctionneront plus aussi efficacement. (Malgré ces difficultés, K. Itakura et ses collaborateurs ont synthétisé deux chaînes d'ADN correspondant aux deux chaînes de l'insuline humaine: ils les ont attachées séparément, comme la somatostatine, à un même gène bactérien de grande dimension, afin de synthétiser deux protéines hybrides. Ils ont alors découpé les deux courts fragments, ils les ont purifiés et remis ensemble pour former l'insuline.)

L'expérience avec la pro-insuline

Dans nos expériences, nous sommes partis d'une tumeur de cellules bêta de rat productrices d'insuline. (Nous avons travaillé avec l'insuline



7. ON UTILISE ICI UNE TECHNIQUE mise au point par Stephanie Broome et l'un de nous (W. Gilbert) pour rechercher à l'aide d'un anticorps radioactif les indices d'une synthèse effective d'insuline parmi tous les clones qui contiennent de l'ADN insuline. On prend un disque de plastique recouvert d'anticorps anti-insuline et on le met d'abord en contact avec le contenu cellulaire de chaque clone (1). L'insuline éventuellement présente dans les cellules se lie à l'anticorps (2) et reste donc fixée au disque de plastique (3). Puis on applique sur le disque un anticorps anti-insuline marqué radioactivement (en couleur) pour détecter la présence de la protéine (4, 5). Si l'on répète l'expérience avec un disque de plastique recouvert d'un anticorps anti-pénicilline, seules des protéines hybrides, en partie pénicilline et en partie insuline, pourront se lier à l'anticorps marqué.

de rat parce que, au moment où nous avons commencé nos expériences, les règles établies par l'Institut de la Santé pour les recherches sur l'ADN recombinant ne nous permettaient pas d'insérer le gène de l'insuline humaine dans des bactéries; cette interdiction a été levée depuis.)

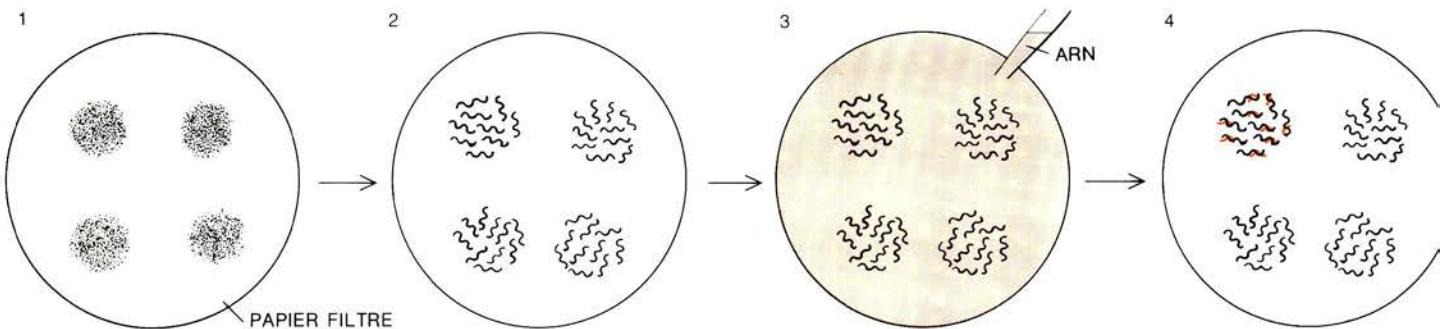
Nous avons fait, à partir de l'ARN messager de cellules bêta, des copies d'ADN que nous avons intégrées dans un plasmide, au milieu du gène d'une protéine bactérienne, la pénicillinase, qui est normalement sécrétée à travers la membrane de la cellule bactérienne. Nous avons trié les colonies bactériennes par hybridation; nous avons ensuite montré que nous avions bien le plasmide hybride en bloquant la synthèse de l'insuline *in vitro* selon la méthode que nous avons décrite plus haut et nous avons analysé la séquence de l'ADN pour

savoir exactement quelle partie du gène de l'insuline nous avions. Une fois que nous avons trouvé un plasmide hybride, nous l'avons utilisé pour en trouver 48 autres en répétant l'expérience d'hybridation. Ces 48 clones représentaient deux pour cent de l'ensemble des clones que nous avons faits.

Est-ce que l'un de ces clones allait vraiment synthétiser l'insuline? Nous avons cherché, parmi les clones qui contenaient de l'ADN d'insuline, ceux qui synthétiseraient une protéine hybride dont une partie serait la pro-insuline. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur une réaction très sensible avec des anticorps radioactifs. Nous avons tapissé des disques de plastique avec des anticorps dirigés soit contre l'insuline, soit contre la pénicillinase, et nous les avons exposés au contenu cellu-

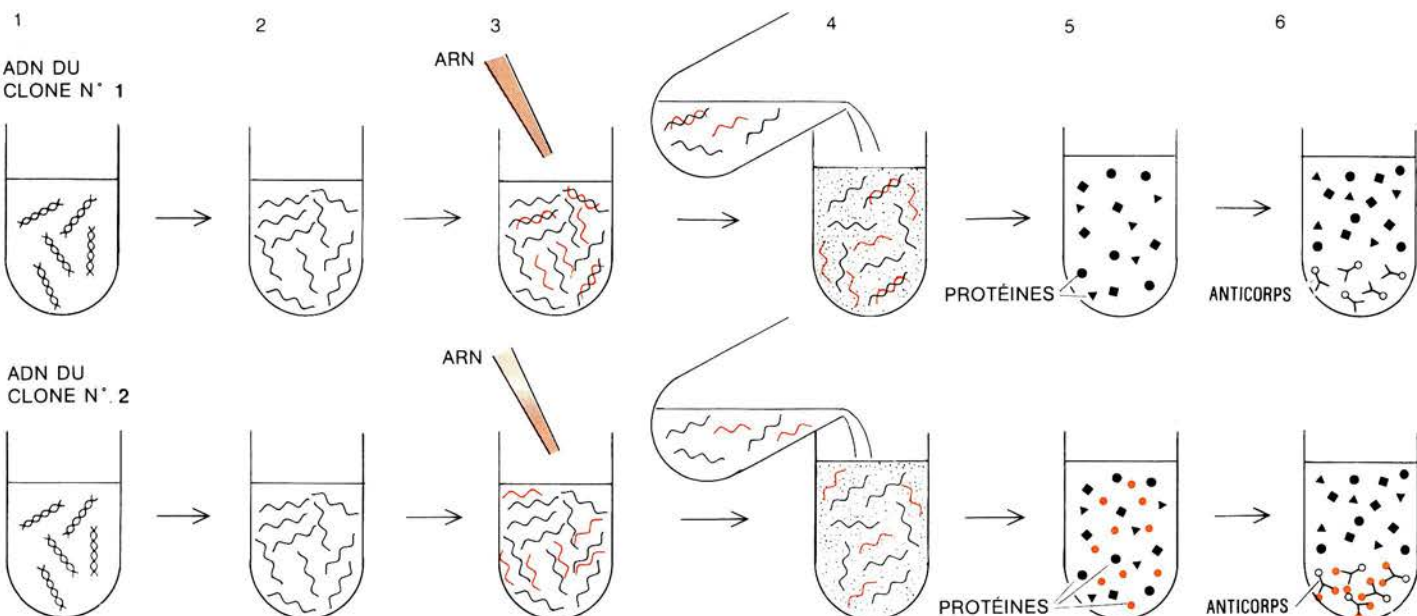
laire de chaque clone. Les molécules d'insuline (ou de pénicillinase) présentes dans les cellules se lient aux anticorps et se trouvent ainsi fixées aux disques de plastique. Nous avons alors appliqué des anticorps anti-insuline marqués radioactivement pour détecter les protéines ayant la forme de l'insuline. L'un des clones donna des réponses positives à l'anticorps marqué spécifique de l'insuline, à la fois sur les disques recouverts d'anti-insuline et sur ceux recouverts d'anti-pénicillinase; ceci montrait l'existence d'une protéine hybride pénicillinase-insuline (voir figure 7).

Nous voulions savoir si les bactéries sécrétaient la protéine hybride; nous avons donc cultivé le clone en milieu liquide et essayé d'extraire la protéine par une méthode qui ne fait pas éclater la membrane de la bactérie. Cette expérience montra que la



8. LES CLONES CONTENANT L'ADN DESIRE peuvent être trouvés parmi tous les clones que l'on a transformés, si l'on possède une sonde pure d'ARN messager correspondant à la séquence cherchée (1): on réalise une hybridation de l'ARN à l'ADN. Pour cela, on fait éclater les bactéries, on dénature leur ADN et on le

fixe sur le papier filtre (2). On ajoute la sonde d'ARN (c'est-à-dire des molécules d'ARN marquées avec un isotope radioactif) (3). L'ARN (*en couleur*) va former des hybrides avec toutes les molécules d'ADN qui portent une séquence homologue à la sienne (4); on élimine ensuite par lavage le reste de l'ARN. La présence des hybrides est



9. L'ARRET DE LA TRADUCTION par formation d'un hybride, technique mise au point par Bryan Roberts, de Harvard, permet d'identifier un clone contenant l'ADN cherché (*série supérieure*) même si l'on ne dispose pas d'une sonde d'ARN purifié. L'ADN des clones à tester (1) est dénaturé (2). On ajoute l'ARN non purifié (celui-là même que l'on a utilisé pour fabriquer l'ADN inséré au plasmide) qui s'hybride avec toute molécule d'ADN complémentaire (3). Si l'on place le

mélange dans un « système de traduction » contenant des acides aminés marqués radioactivement (4), l'ARN non hybridé à l'ADN dirige la synthèse de protéines radioactives, alors que l'ARN hybridé ne peut être traduit; la protéine particulière (*en couleur*) codée par l'ADN cherché n'est donc pas synthétisée en présence de cet ADN (5). La présence ou l'absence de cette protéine est mise en évidence par l'utilisation d'un anticorps. On ajoute l'anticorps spécifique de la protéine après l'avoir

protéine fusionnée était effectivement présente, hors de la membrane : elle était sécrétée, comme nous l'avions espéré.

L'analyse de la séquence a montré que le fragment d'ADN et les particularités de la fusion étaient tels que l'information structurale contenue dans le clone ne codait que pour la pro-insuline et ne contenait pas la région « pré ». Pour obtenir l'insuline, nous avons éliminé la plus grande partie de la protéine bactérienne et le fragment médian de la pro-insuline avec une enzyme digestive, la trypsine. L'insuline fabriquée par les bactéries serait-elle une hormone active? Stephen Naber et William Chick, du Laboratoire de Recherche Elliot Joslin à Boston, ont montré que cette molécule affectait le métabolisme des sucres dans les cellules adipeuses, comme on s'y attendait.

L'amélioration du rendement

La quantité de pro-insuline obtenue par le clone original étant très réduite, nous sommes actuellement engagés dans diverses manipulations visant à en améliorer la production. Les signaux de régulation ne doivent pas seulement être efficaces : il faut également que leur emplacement soit optimisé. On n'est pas obligé de se satisfaire des signaux qui entourent par hasard des gènes bactériens préexistants. Avec les enzymes de restriction, il est possible d'exciser de petits fragments d'ADN qui ne portent que des signaux de régulation et de les lier par une autre enzyme de jonction de manière à obtenir de nouvelles combinaisons. On peut aussi, avant de les reconnecter, retailer les extrémités de ces fragments en faisant rogner quelques bases par une enzyme d'un autre type. Ceci modifie l'espacement entre les signaux et la séquence structurale. Bien que chacune de ces manipulations ne produise qu'un petit nombre de molécules correctes, on peut, en effectuant un clonage à chaque étape, fabriquer de grandes quantités d'ADN, établir sa séquence, puis continuer les manipulations.

En outre, il est possible de synthétiser les courtes séquences d'ADN que l'on veut obtenir pour les relier à d'autres fragments. Ainsi David Goeddel et ses collaborateurs de Genentech Inc. ont pris un morceau d'ADN contenant l'information structurale de l'hormone de croissance humaine (168 acides aminés), l'ont lié à un morceau d'ADN synthétique contenant une partie du signal de démarrage de la traduction et ont ensuite attaché cette combinaison à un fragment contenant le reste des signaux de régulation. Lorsque cette construction d'ADN a été clonée, les bactéries ont synthétisé une protéine ayant la surface (d'après l'expérience de reconnaissance par les anticorps) et la taille de l'hormone de croissance. Cependant, l'activité hormonale de cette molécule n'a pas encore été mise en évidence.

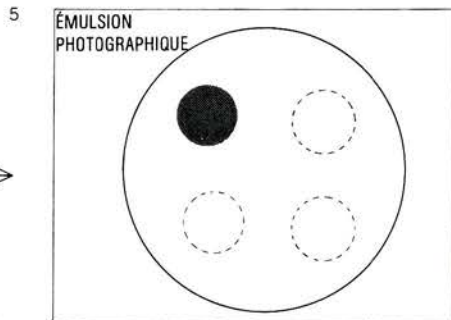
Nous ne connaissons pas encore les combinaisons optimales des éléments de l'ADN utilisés pour fabriquer de l'insuline dans les bactéries, mais leur découverte n'est maintenant qu'une question de temps. Il y a d'autres problèmes à prendre en considération. Les nouvelles protéines d'origine animale sont souvent dégradées dans la cellule bactérienne parce que leur structure est telle que les enzymes normalement présentes dans les bactéries peuvent les digérer. Il faut trouver les moyens de stabiliser les protéines, soit en retirant ces enzymes, soit en enrobant la protéine nouvelle dans une protéine hybride pour la protéger, soit enfin en la faisant sécréter par la cellule. Les molécules d'ARN messager, elles

aussi, sont souvent instables dans la cellule; des modifications de leur structure et de la cellule elle-même peuvent les rendre plus efficaces et augmenter la synthèse des protéines correspondantes. Et si, dans chaque cellule, on parvient à augmenter le nombre de copies du plasmide porteur du gène, on synthétise de plus grandes quantités de produit.

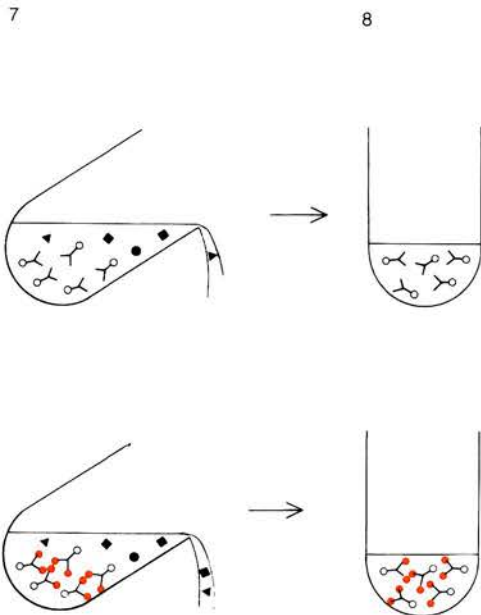
Tout en travaillant à améliorer la production d'insuline de rat, et à purifier la molécule obtenue, nous espérons pouvoir appliquer les mêmes méthodes pour la synthèse d'insuline humaine dans les bactéries. Des chercheurs d'autres laboratoires travaillent également sur ce problème et on peut espérer que la fabrication d'insuline humaine par les bactéries reviendra finalement moins cher que la purification de l'insuline de porc ou de bœuf, qui sont les sources actuelles de cette hormone. Il est clair que l'on peut préparer d'autres hormones humaines selon cette méthodologie. Quelles autres protéines d'intérêts thérapeutiques pourrait-on faire avec les bactéries? D'une manière générale, toute protéine humaine qu'on ne peut obtenir des animaux sous une forme utilisable a de grande chance d'être synthétisée ainsi.

Autres protéines pouvant être produites par les bactéries

Beaucoup de maladies génétiques sont provoquées par le manque d'une seule protéine. On pourrait pratiquer une thérapeutique de remplacement si les bactéries pouvaient fabriquer ces protéines. Une autre grande catégorie d'applications possibles serait la production de vaccins contre les infections virales ou parasitaires. Pour fabriquer un vaccin aujourd'hui, il est nécessaire de cultiver l'organisme pathogène en grandes quantités, ce qui est souvent impossible ou dangereux. De plus, le vaccin doit être rendu inoffensif avant d'être administré, et cela peut présenter des difficultés. La technologie nouvelle que nous avons décrite peut permettre de fabriquer dans les bactéries uniquement la protéine contre laquelle la réponse immunitaire doit être dirigée. Ceci éliminerait toute obligation de travailler avec l'organisme intact. Le virus de l'hépatite B par exemple, responsable de l'hépatite sérique, ne peut être cultivé à l'extérieur du corps. La seule source de ce petit virus à ADN est le sang des malades qu'il a infectés. On a maintenant cloné l'ADN de ce virus dans différents laboratoires et on a déterminé sa séquence complète, ce qui a révélé la structure des protéines virales. Ces protéines sont maintenant fabriquées dans des bactéries et un flot d'informations nouvelles est venu de ce travail.



révélée par autoradiographie : on place une émulsion photographique sur le papier filtre et après exposition, on peut identifier sous la forme d'une tache sombre le clone contenant l'ADN cherché (5).



fixé à des billes de plastique; celui-ci se lie à la protéine et la maintient ainsi sous forme de précipité que l'on peut séparer du surnageant liquide (6, 7). La mesure de la radioactivité du précipité (8) montre que le clone du haut contient l'ADN cherché : il a bloqué la synthèse de la protéine correspondante.

Un candidat plein de promesses est l'interféron, une protéine que les cellules fabriquent pour bloquer rapidement les infections virales. (La réponse humorale est beaucoup plus lente.) L'interféron semble constituer la première ligne de défense contre les virus. Il pourrait aussi avoir un effet thérapeutique dans certains cancers. Cependant, on n'a jamais obtenu d'interféron en quantités suffisantes pour pouvoir mesurer son efficacité réelle dans la protection contre les maladies. Mais il va bientôt être possible de mesurer l'activité de l'interféron humain car on le fait d'ores et déjà fabriquer par des bactéries. C. Weissmann et ses collègues ainsi que Kari Cantell de la Croix Rouge finlandaise, ont appliqué la plupart des techniques décrites ci-dessus pour cloner et faire exprimer cette protéine. Le problème qu'ils ont rencontré était le suivant : l'ARN messager de l'interféron est beaucoup plus rare que celui de l'insuline, même dans

les globules blancs stimulés par une infection virale dans leur synthèse de l'interféron. Ils ont prélevé l'ARN messager de ces globules blancs (17 litres en une fois) et fait un ADNc à double brin qu'ils ont cloné selon les méthodes que nous avons décrites.

Ces chercheurs examinèrent quelque 20 000 clones (par lots). Pour cela, ils hybridèrent à l'ARN messager des globules blancs l'ADN plasmidique des clones, puis isolèrent l'ARN qui s'accrochait et vérifièrent si cet ARN était capable de diriger la synthèse de l'interféron. Ces expériences n'ont pas été réalisées dans un tube à essai mais dans une cellule particulièrement grande, l'œuf de grenouille. Heureusement, l'interféron est une substance remarquablement puissante, et ils ont pu détecter sa synthèse dans l'œuf de grenouille par la capacité du produit à protéger les cellules contre les virus.

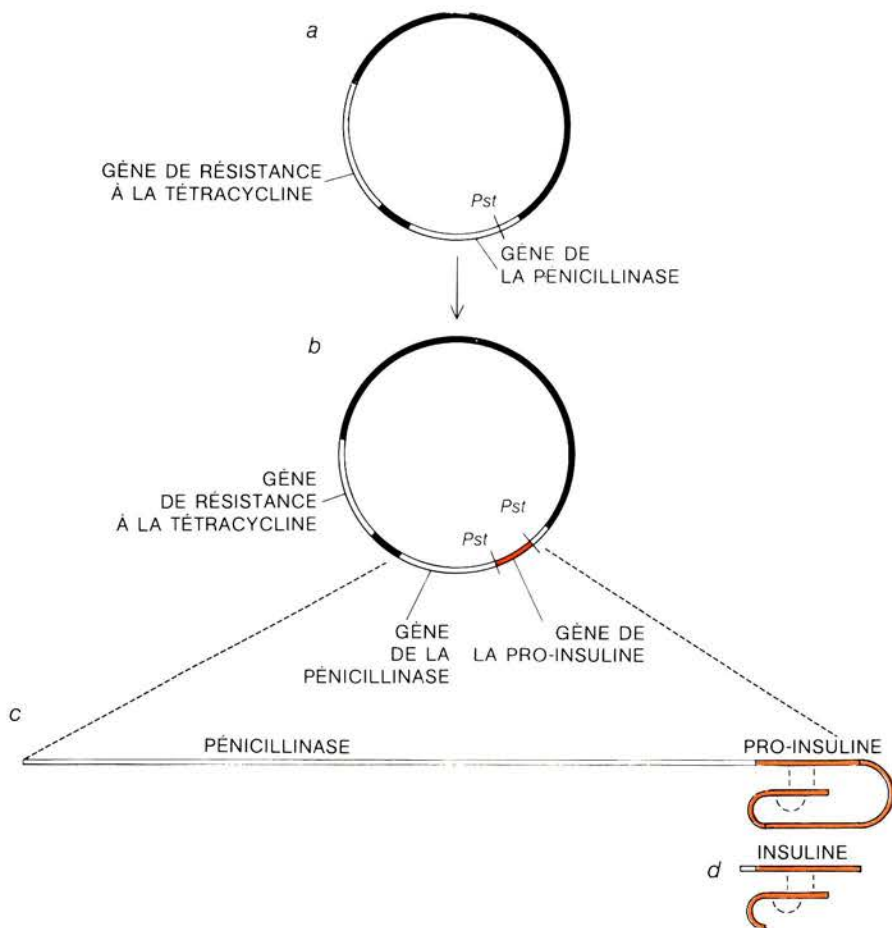
Lorsque C. Weissmann et ses collègues ont obtenu un lot de clones qui

s'hybridait à l'ARN messager de l'interféron, ils ont de nouveau soumis ces clones à un test par groupes de plus en plus réduits pour en identifier un bon. Ils ont alors utilisé ce clone comme sonde et ont pu, par hybridation, en trouver d'autres. Finalement, pour savoir si certains clones fabriquaient de l'interféron biologiquement actif, ils ont contrôlé directement les extraits des bactéries qui contenaient de l'ADN d'interféron (intégré dans le gène de la pénicilline). Ils en ont effectivement obtenu dans un certain nombre de cas, ce qui confirmait que l'ADN de l'interféron avait été correctement identifié. L'analyse de la séquence d'ADN de ces clones déterminera la structure de l'interféron, qui pour l'instant, n'est pas encore connue.

La quantité d'interféron fabriquée par les bactéries était extrêmement petite : seulement une ou deux molécules par cellule. (Habituellement, les protéines bactériennes sont fabriquées à raison de 1 000 à 100 000 exemplaires par cellule). Nous sommes confiants et nous pensons que, à l'aide des méthodes que nous venons de décrire, nous pourrions résoudre ce problème et produire de l'interféron en quantité suffisante pour les essais cliniques.

Le débat sur les manipulations génétiques

Le développement des techniques de génie génétique décrites dans cet article a été accueilli ces dix dernières années à la fois avec un grand enthousiasme et une certaine angoisse. L'intérêt de ces techniques était évident, mais certains pensaient qu'il y avait lieu de s'inquiéter. Aussi, les biologistes demandèrent-ils une évaluation des risques potentiels de ces recherches : cela se traduisit par un effort national et international sans précédent dans lequel le public, les gouvernements et la communauté scientifique se joignirent pour régler les activités de recherche. Les connaissances nouvelles sur les propriétés des gènes et le comportement des bactéries utilisées dans ce travail (habituellement *Escherichia coli*) ont apaisé ces inquiétudes et ont favorisé un assouplissement des restrictions imposées à ce type d'expériences. Rétrospectivement, et avec l'avantage du recul, il nous semble que les inquiétudes quant aux dangers hypothétiques étaient injustifiées. Nous n'avons connaissance d'aucun effet contraire de ces recherches, et on est beaucoup plus près des réalisations concrètes offertes par ces techniques nouvelles qu'on ne le croyait il y a seulement quelques années; ces réalisations portent aussi bien sur les connaissances fondamentales que sur des produits de biosynthèse d'un intérêt immédiat pour la société. ■



10. LES AUTEURS ONT OBTENU DE L'INSULINE de rat à partir d'une protéine hybride composée d'un fragment de la molécule de pénicilline bactérienne et d'une molécule de pro-insuline, le précurseur de l'insuline. La carte du plasmide qui a servi de vecteur, pBR 322, (a) montre l'emplacement des deux gènes qui codent pour les deux enzymes conférant la résistance aux antibiotiques et le site de clivage par l'enzyme de restriction Pst. La carte suivante (b) montre la structure du plasmide recombinant contenu dans le clone bactérien qui synthétise la pro-insuline, telle qu'elle a été déterminée par l'analyse de la séquence de l'ADN. La séquence pro-insuline (en couleur) se trouve entre deux sites Pst créés lors du processus d'insertion. La protéine hybride synthétisée par le clone (c) comprend la plus grande partie de la pénicilline ainsi que la molécule de pro-insuline (en couleur); les tirets représentent les ponts disulfure. Les auteurs ont excisé presque toute la pénicilline et le fragment central de la pro-insuline (de couleur claire) pour fabriquer de l'insuline biologiquement active (d).

CHOISISSEZ DE RECEVOIR

POUR LA

SCIENCE

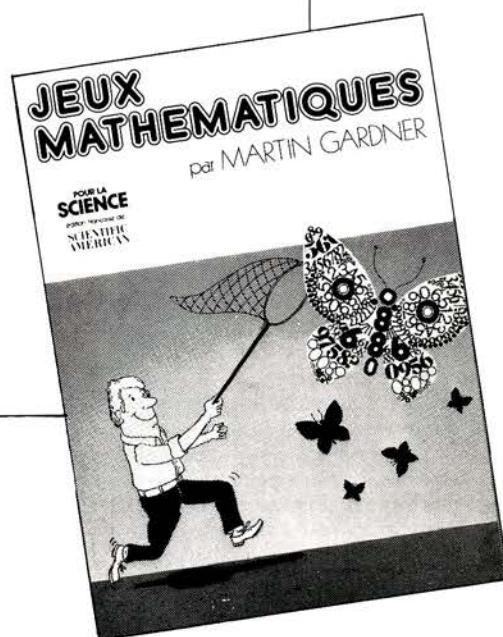
CHAQUE MOIS A VOTRE DOMICILE

Bénéficiez du tarif préférentiel*
et recevez en cadeau de bienvenue

Le livre
"JEUX MATHÉMATIQUES"
de Martin Gardner

Recueil des rubriques mensuelles parues dans
POUR LA SCIENCE.

* Le tarif préférentiel vous permet de réaliser une économie
de 5,50 F par numéro sur un abonnement de trois ans.



voir encart page 39

La structure primitive de l'Univers

La structure à grande échelle de l'Univers actuel est régulière à un millième près. Certaines observations montrent qu'il en était déjà de même 10^{35} seconde après le « big bang ».

par John Barrow et Joseph Silk

Selon le principe cosmologique, un concept très puissant, l'Univers est homogène et isotrope. En d'autres termes, l'aspect à grande échelle de l'Univers serait le même pour un observateur situé dans une galaxie quelconque, quelle que soit la direction d'observation. Un grand nombre d'observations et de travaux expérimentaux tendent à confirmer le principe cosmologique, qui est fermement enraciné dans la physique et la philosophie naturelle. Comment l'Univers a-t-il acquis sa structure uniforme à grande échelle? Deux réponses sont possibles : ou bien il a toujours eu à peu près cette structure, ou bien il était très irrégulier et chaotique immédiatement après le « big bang », et sa forme actuelle résulterait d'une évolution sous l'effet de mécanismes de « lissage » et de chauffage. Dans cette seconde hypothèse, que l'on appelle la cosmologie chaotique, les mécanismes de lissage et de chauffage engendreraient l'Univers uniforme actuel, quel que soit le degré de son irrégularité originelle. Les théories de la cosmologie chaotique nous permettent donc d'éliminer un problème bien embarrassant, à savoir quelles étaient les conditions initiales de l'Univers?

Si l'élimination de ce problème est une commodité séduisante, de telles théories présentent cependant un inconvénient majeur. Nous pensons que les mécanismes de lissage et de chauffage qui ont été proposés auraient libéré, d'une façon irréversible, beaucoup plus d'énergie thermique qu'il ne semble en exister dans l'Univers actuel. C'est pourquoi nous pensons que l'Univers n'avait, au moment de sa création, qu'un degré infime d'irrégularité. On ignore encore ce qui s'est passé à l'instant précis de cette création, car des principes physiques inhabituels, liés aux densités et aux températures énormes qui régnaient en cet instant, masquent la structure initiale de l'Univers. Le comportement de la matière ne nous éclaire pas beaucoup sur l'état de

l'Univers 10^{35} seconde après le début de son existence.

L'observation de l'expansion de l'Univers, où les amas de galaxies s'éloignent à grande vitesse les uns des autres, conforte le principe cosmologique. En 1923, Edwin Hubble découvrit que la vitesse d'expansion augmentait avec l'éloignement de l'objet observé. Il détecta ce mouvement de récession des galaxies éloignées en mesurant leur spectre optique. Lorsqu'un rayonnement électromagnétique provenant d'un objet éloigné atteint la Terre, sa longueur d'onde est accrue par la vitesse de récession de l'objet par rapport à l'observateur. Quand ce rayonnement est dans le domaine visible, il devient alors plus rouge. C'est pourquoi on dénomme ce phénomène « décalage spectral vers le rouge ».

On exprime la valeur de ce décalage spectral vers le rouge par un nombre correspondant au quotient de l'augmentation de la longueur d'onde par la longueur d'onde. Ainsi, les galaxies situées à 20 millions d'années de lumière (les galaxies les plus proches de notre propre Galaxie) ont un décalage spectral vers le rouge de 0,001, et les galaxies situées à dix milliards d'années de lumière (les plus éloignées) ont un décalage spectral de 0,75. En mesurant les décalages spectraux vers le rouge, E. Hubble a pu calculer la vitesse de récession de galaxies lointaines et mesurer la vitesse d'expansion de l'Univers.

L'expansion, l'isotropie et l'homogénéité de l'Univers

Pour faire comprendre la nature de cette expansion, on utilise souvent l'image suivante : on assimile l'Univers à un ballon et des points imprimés sur la surface de ce ballon figurent les galaxies. Si l'on gonfle le ballon, la distance qui sépare deux points quelconques, mesurée sur la surface du ballon, augmente proportionnellement à la distance entre les

deux points. Un observateur situé sur l'un de ces points voit tous les autres points s'éloigner de lui uniformément dans toutes les directions; aucun observateur n'occupe une place privilégiée. Autrement dit, l'expansion n'a pas de centre.

On ne sait pas si l'expansion de l'Univers se poursuivra indéfiniment ou si les galaxies cesseront un jour de s'éloigner les unes des autres pour se déplacer dans le sens opposé et finalement tomber les unes sur les autres. Ces deux éventualités sont possibles dans la théorie cosmologique admise actuellement, et selon laquelle l'Univers naquit d'une explosion (le « big bang ») à partir d'un état super-dense. Le type d'expansion est déterminé par la géométrie spatio-temporelle de l'Univers. Si l'expansion est infinie, l'Univers est « ouvert »; si l'expansion est finie et suivie d'un effondrement, l'Univers est dit « clos ». Dans le cas critique intermédiaire, défendu par Albert Einstein et William de Sitter en 1932, l'Univers possède juste assez d'énergie pour équilibrer l'influence décélétratrice de la gravitation et se dilater sans cesse jusqu'à l'infini. L'Univers est-il ouvert ou clos? Il est difficile de répondre à cette question car l'énergie d'expansion est proche de la valeur critique. Ce problème fait actuellement l'objet de recherches intensives.

L'Univers est homogène et isotrope, non seulement pour ce qui est de son taux d'expansion mais aussi pour la répartition des objets qui le constituent. E. Hubble a compté le nombre des galaxies dans différentes directions angulaires et dans différents volumes du ciel. Il a trouvé que plus le volume considéré était grand, plus il contenait de galaxies. En outre, la répartition des galaxies ne variait guère avec la direction d'observation. Des dénombrements plus récents ont confirmé l'uniformité de la répartition des galaxies dans l'Univers pour des distances beaucoup plus grandes. Ainsi, lorsque l'on compare des

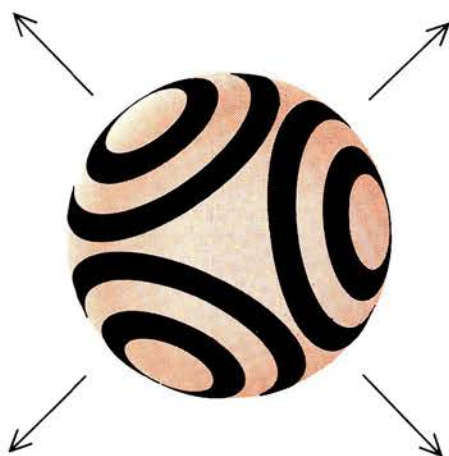
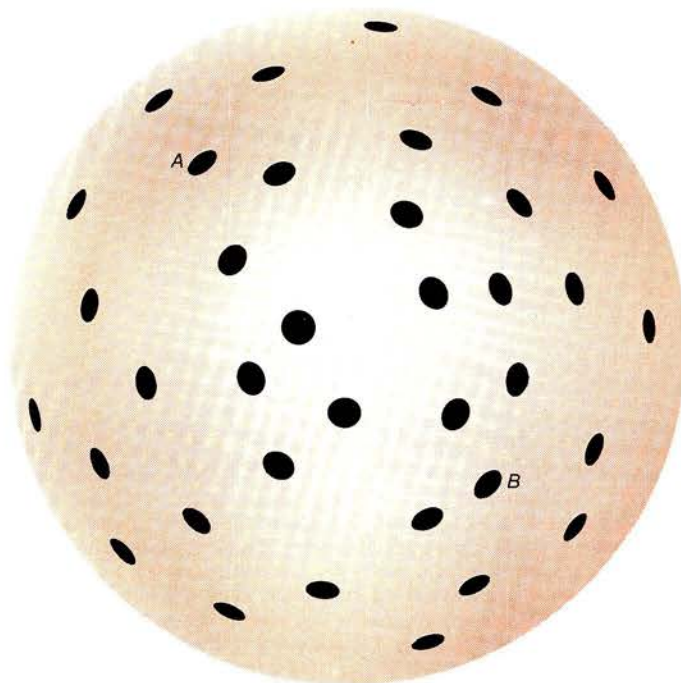
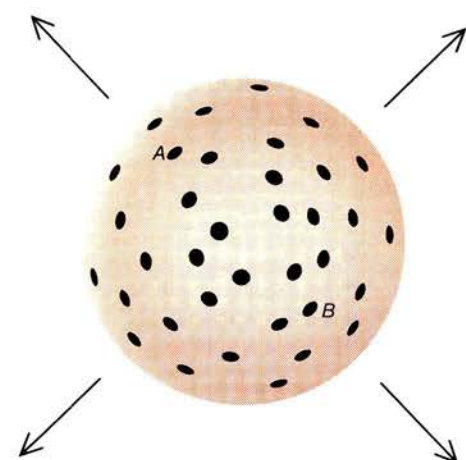
régions éloignées ayant un rayon d'un gigaparsec (3×10^9 années de lumière), on trouve que leur population en objets émetteurs d'ondes radio (galaxies et quasars) est identique à un pour cent près.

L'indice le plus convaincant de l'isotropie de l'Univers est le rayonnement en micro-ondes, dans le domaine millimétrique, qui semble baigner tout l'Univers. Ce rayonnement fut découvert en 1965 par Arno Penzias et Robert Wilson des Laboratoires

Bell. Des cartes du ciel en rayonnement micro-ondes, fondées sur les mesures faites par des antennes portées à haute altitude par des avions ou des ballons, montrent que l'intensité de ce rayonnement est isotrope à au plus un millièmè près.

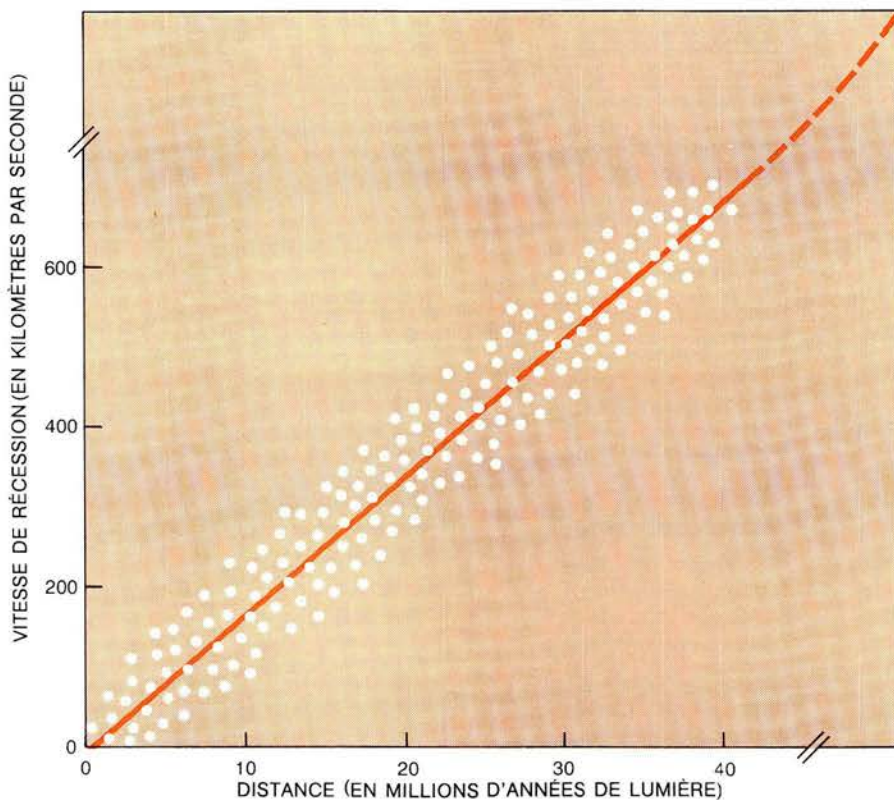
Il est plus difficile d'exprimer quantitativement l'homogénéité de l'Univers. A petite échelle, dans un volume comparable à celui du système solaire ou de notre Galaxie par exemple, l'Univers est évidemment

loin d'être homogène. Mais à plus grande échelle, l'homogénéité de la matière contenue est indiquée par l'uniformité de la répartition des galaxies visibles et des sources radio, et aussi par l'uniformité du fond universel de rayonnement X. A l'échelle de tout l'Univers observable, l'indice d'uniformité le plus sensible est le rayonnement cosmologique en micro-ondes, qui est homogène à mieux d'un millièmè près. Cette mesure n'est pas définitive cependant car ce

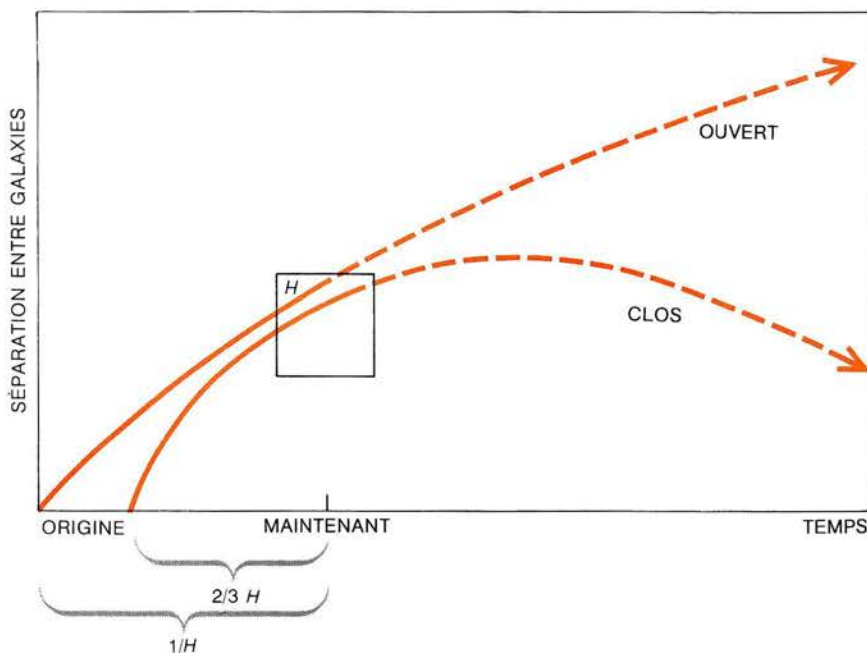


1. LE MODELE DU BALLON est utilisé traditionnellement pour représenter l'expansion uniforme dans toutes les directions de l'Univers réel. Chaque point sur la surface du ballon (*en haut à gauche*) correspond à une galaxie. Lorsqu'on gonfle le ballon (*en haut à droite*) la distance qui sépare deux points quelconques sur sa surface augmente proportionnellement à cette distance. Quel que soit le point choisi (par

exemple *A* ou *B*), tous les autres points s'éloignent de lui uniformément dans toutes les directions sur la surface. Cela démontre que l'expansion n'a pas de centre. La répartition géométrique des points ne change pas au cours du gonflage du ballon. Un ballon où l'on a dessiné un motif (*en bas à gauche*) portera le même motif après qu'il a été gonflé (*en bas à droite*). L'expansion de l'Univers réel est uniforme à 1 pour 1 000 près.



2. LA VITESSE DE RECESSION D'UNE GALAXIE est proportionnelle à la distance entre l'observateur et cette galaxie. La constante de Hubble (*trait plein en couleur*), qui exprime l'accroissement de la vitesse de récession avec la distance, a une valeur d'environ 17 kilomètres par seconde par million d'années de lumière. (La constante de Hubble est une constante dans le sens où elle est identique pour toutes les galaxies existantes; elle change au fur et à mesure que l'Univers poursuit son expansion.) Le quotient de la vitesse par la distance peut s'écarter de la constante de Hubble pour une galaxie individuelle (*points blancs*) qui aura une vitesse orbitale puisqu'elle fait partie d'un amas. Les vitesses de récession ont été probablement ralenties depuis le « big bang » en raison de l'attraction gravitationnelle de la matière en expansion. En conséquence, le quotient de la vitesse par la distance peut être plus grand aux distances extrêmes (*courbe en pointillés de couleur*).



3. LES MODELES D'EVOLUTION COSMIQUES montrent comment la distance entre les galaxies varie avec le temps. Si l'expansion de l'Univers se poursuit indéfiniment, l'âge de l'Univers est le temps de Hubble, c'est-à-dire l'inverse de la constante de Hubble H ; on dit alors que l'Univers est ouvert. En revanche, si l'Univers cesse son expansion pour finalement se contracter, l'âge de l'Univers est inférieur à $2/(3H)$ et l'on dit alors que l'Univers est clos.

rayonnement a peut-être été rediffusé par le milieu intergalactique au cours de son trajet vers le système solaire; cette diffusion aurait eu pour effet d'effacer ses inégalités.

Le rayonnement cosmologique en micro-ondes nous apporte bien plus d'information sur l'histoire récente de l'Univers que le principe cosmologique. En effet, le spectre de ce rayonnement est identique à celui d'un corps noir (un émetteur parfait de rayonnement thermique) à une température absolue de 2,9 kelvins (2,9 degrés Celsius au-dessus du zéro absolu). Ce rayonnement n'est plus aujourd'hui qu'une faible lueur, mais il atteste un passé très « ardent ». Pour que ce rayonnement ait le spectre d'un corps noir, l'Univers primitif a dû passer par une phase dense, à très haute température. L'existence du rayonnement cosmologique est l'une des prédictions les plus remarquables de la cosmologie moderne : George Gamow et ses collaborateurs Ralph Alpher et Robert Herman prédisaient qu'on devait voir, encore à l'heure actuelle, un résidu refroidi du « big bang » sous forme de ce rayonnement thermique cosmologique de corps noir. G. Gamow pensait que tous les éléments chimiques, à l'exception de l'hydrogène, avaient pu être créés au cours de la phase chaude et dense de l'Univers, juste après le « big bang ». Pour lui, l'Univers était un gigantesque réacteur thermo-nucléaire et le simple fait que l'Univers n'ait pas brûlé immédiatement tout son hydrogène en le convertissant en hélium, conduisit G. Gamow à prédire que le rayonnement, bien que fortement refroidi et « dilué » par l'expansion, devait encore exister à une température de l'ordre de cinq kelvins.

L'entropie de l'Univers

Nous savons aujourd'hui que l'Univers n'est pas resté chaud et dense suffisamment longtemps pour que des éléments lourds comme le carbone et le fer puissent être créés par des réactions successives à partir des protons et des neutrons primitifs : ces éléments lourds ont été synthétisés à l'intérieur des étoiles. Les étoiles les plus vieilles semblent déficientes en éléments lourds, ce qui signifie qu'elles se seraient formées dans un environnement pauvre en ces éléments. Pourtant, ces étoiles vieilles ont à peu près la même quantité d'hélium que les étoiles beaucoup plus jeunes et riches en éléments lourds. En outre, de nombreuses espèces de galaxies ont la même teneur en hélium. Cette uniformité universelle de la répartition d'hélium (cet élément vient juste après l'hydrogène en terme d'abondance cosmique) indique, comme l'avait prévu G. Gamow, qu'il a surtout été créé, non pas à

l'intérieur des étoiles, mais dans l'environnement brûlant qui a suivi le « big bang ». L'accord général entre la prédiction d'un rayonnement de corps noir à cinq kelvins et la découverte faite par A. Penzias et R. Wilson du rayonnement à 2,9 kelvins, ainsi que la prédiction exacte de l'abondance primitive de l'hélium, sont les arguments les plus convaincants en faveur d'un « big bang » à très haute température.

A partir des données sur le rayonnement cosmologique en micro-ondes, les théoriciens ont calculé une nouvelle grandeur fondamentale : le rapport du nombre de photons au nombre de nucléons dans l'Univers. (Les photons sont les particules sans masse du rayonnement électromagnétique; les nucléons — protons et neutrons — ont une masse). Ce rapport est d'environ 10^8 photons pour un nucléon; il mesure l'entropie thermique moyenne associée à chaque nucléon. L'entropie, habituellement représentée par le symbole S , caractérise le nombre d'états possibles dans un système. Autrement dit, l'entropie est une mesure du désordre. Un liquide est un exemple de système à haute entropie car ses atomes peuvent se disposer selon un nombre énorme d'arrangements; un réseau cristallin est un exemple de système à plus petite entropie car ses atomes sont rangés de façon bien plus ordonnée. Si le rapport du nombre de photons au nombre de nucléons (pour un très grand volume de l'Univers) est une mesure de l'entropie moyenne, c'est parce que les photons constituent les états d'énergie thermique les plus désordonnés, tandis que les nucléons constituent les états les mieux ordonnés. Ainsi, les abondances relatives de ces deux états extrêmes donnent une mesure de l'entropie moyenne.

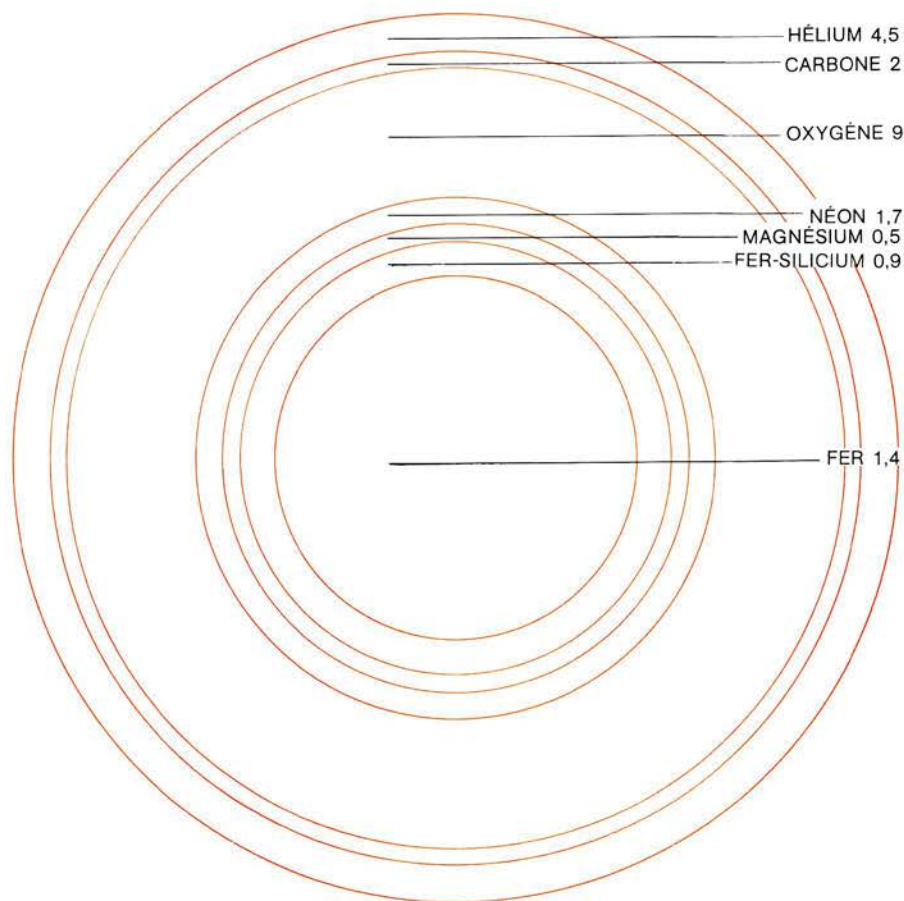
Selon le deuxième principe de la thermodynamique, l'entropie totale de l'Univers augmente continuellement avec le temps. Au moment du « big bang », S était donc plus petit que 10^8 . L'expansion isotrope de l'Univers n'ayant pas dissipé beaucoup de chaleur, l'accroissement de S doit nécessairement résulter d'un autre mécanisme. Une entropie de 10^8 est bien grande, comparée à l'entropie d'environ 1 qui caractérise les systèmes de l'environnement terrestre. Cela signifie que l'Univers dans son ensemble est relativement chaud. La première réaction d'un physicien en présence d'un tel système, à la fois chaud et très régulier, est de supposer qu'une grande quantité d'énergie thermique a été dissipée au cours de l'histoire de ce système, la chaleur et la régularité résultant de processus d'uniformisation par frottement. Nous allons essayer de démontrer, cependant, que dans le cas de l'Univers cette interprétation est probablement erronée.

Un Univers bien singulier

En remontant dans le passé par extrapolation, de l'Univers actuel en expansion jusqu'à l'époque qui a précédé la formation des galaxies, les cosmologistes ont découvert à l'origine de l'Univers une « singularité » spatio-temporelle : un état de densité apparemment infinie. Cette singularité traduit l'origine de l'espace et du temps, il y a de cela peut-être dix milliards d'années. Auparavant, les lois de la physique connues aujourd'hui ne s'appliquaient pas! Est-ce là une preuve du savoir des physiciens ou de leur ignorance? Avant 1965 les cosmologistes s'interrogeaient sur la signification physique de cette singularité. Certains théoriciens pensaient qu'elle pouvait n'être qu'une manifestation parasite du système de coordonnées choisi pour décrire la dynamique de l'expansion de l'Univers, manifestation semblable à la singularité que l'on observe en géo-

graphie : en effet sur un globe terrestre, les coordonnées présentent une singularité au pôle Nord et au pôle Sud, où le carroyage en longitudes et latitudes se réduit à un point, là où les méridiens du globe se coupent. Il ne s'agit pourtant là que d'une singularité mathématique : la structure du monde ne présente aucune discontinuité physique aux pôles!

Depuis 1965, plusieurs théoriciens travaillant indépendamment ont montré que la singularité cosmologique n'est pas la conséquence d'un mauvais choix de coordonnées. Au contraire, la singularité semble être générale; c'est une réalité physique, conséquence inévitable de l'attraction gravitationnelle qui agit indistinctement sur toute chose, y compris les photons. La singularité était probablement caractérisée par une densité et une courbure infinies; mais il n'y a qu'une chose certaine : si un observateur matériel remontait le temps, son voyage à travers l'espace-temps se



4. LES ELEMENTS PLUS LOURDS QUE L'HELIUM n'ont pas été synthétisés lors du « big bang », mais à l'intérieur des étoiles. Si la masse de l'étoile est supérieure à 20 fois la masse du Soleil, cette étoile est instable, elle explose et devient une supernova en dispersant les éléments lourds dans l'espace. Lorsqu'une telle étoile se contracte sous l'effet de l'attraction gravitationnelle mutuelle de ses constituants, la pression et la température internes augmentent jusqu'à ce que des réactions thermonucléaires transforment l'hydrogène en hélium. Une fois que la plus grande partie de l'hydrogène dans le noyau de l'étoile a été transformée en hélium, l'étoile reprend sa contraction jusqu'à ce que sa température interne soit assez élevée pour qu'une partie de l'hélium se transforme en carbone. A mesure que l'étoile poursuit sa contraction, sa température augmente encore et le carbone commence à se transformer en éléments plus lourds. A chaque étape, l'étoile laisse une enveloppe d'éléments plus légers. Les masses de ces enveloppes sont exprimées en masses solaires. Pour l'étoile représentée ici, la quasi-totalité de l'hydrogène a été transformée en éléments lourds.

terminerait, en arrivant à cette singularité, par une fin brutale et déconcertante! Il ne pourrait aller plus avant car les lois de la physique exigent que l'Univers ait une frontière d'espace-temps. (Cependant, ce voyageur n'aurait pas nécessairement à subir le « big bang » avec sa densité et sa température infinies.)

La singularité cosmologique est semblable à la singularité de l'horizon d'un trou noir, cette surface hypothétique à l'intérieur de laquelle l'attraction gravitationnelle confine la matière et la lumière. Rien ne peut sortir d'un trou noir, car pour vaincre la force de gravitation il faudrait une vitesse supérieure à celle de la lumière, ce qui est interdit par les lois de la physique. On a montré qu'un astronaute qui aurait la mauvaise fortune de tomber en chute libre dans un trou noir atteindrait la singularité physique en un temps fini (ce temps étant mesuré sur la montre de l'astronaute). La singularité demeurerait invisible pour un observateur extérieur, car elle se trouve à l'intérieur de l'horizon du trou noir. Cependant, puisque les photons subissent l'attraction gravitationnelle,

on peut déterminer si, à un certain moment des tous débuts de l'histoire de l'Univers, les photons qui constituent le rayonnement cosmologique actuel ont pu exercer une attraction gravitationnelle suffisante pour créer une région-piège analogue à un trou noir. A l'intérieur de cette région se trouverait une singularité cosmologique que le physicien définit comme le commencement de l'Univers.

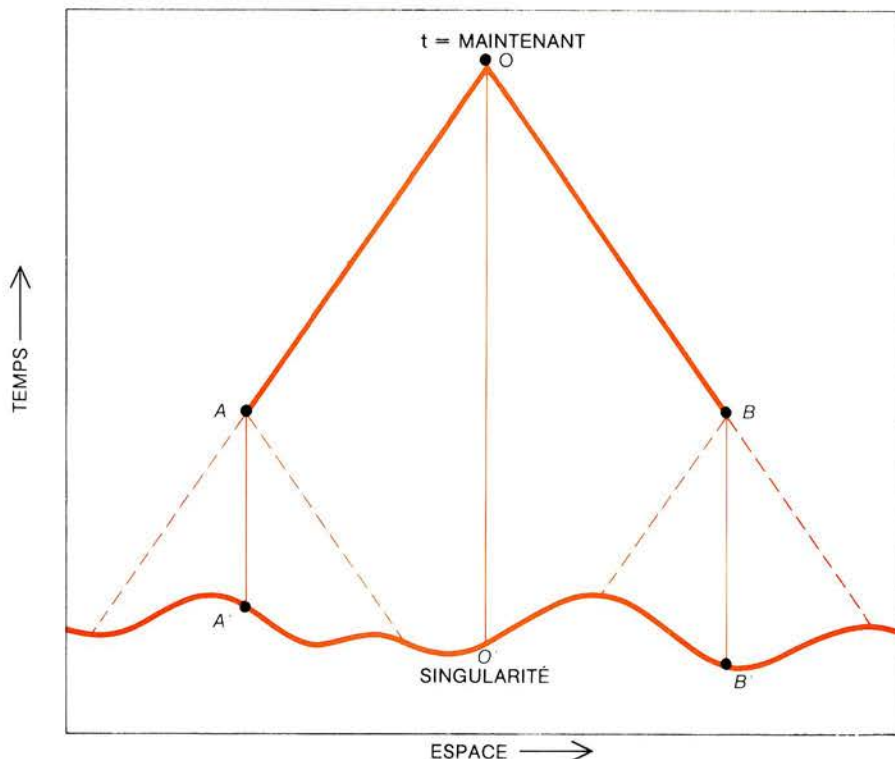
Le fait que l'expansion universelle soit née d'une singularité a d'importantes conséquences sur l'influence causale que peuvent exercer les points de l'Univers les uns sur les autres. Puisque aucun signal ne peut se propager plus vite que la vitesse de la lumière, un observateur ne sera affecté que par certains événements : ceux pour lesquels un photon a eu suffisamment de temps (depuis le commencement de l'Univers) pour l'atteindre. On dit que de tels événements se trouvent à l'intérieur de l'horizon de l'observateur. Considérons deux points séparés, à l'origine des temps, par la distance x . Aussi longtemps que la lumière n'a pas eu le temps de se propager de l'un

à l'autre (c'est-à-dire pendant la durée $t = x/c$, c étant la vitesse de la lumière), ces points ne se « voient » pas, « s'ignorent » et ne peuvent agir en aucune manière l'un sur l'autre. D'une façon générale, les régions de l'Univers séparées par une distance supérieure à ct ne peuvent interagir tant qu'une durée au moins égale à t ne s'est pas écoulée. Cela signifie que des régions du rayonnement cosmologique en micro-ondes isotrope, situées le long de différentes directions du ciel (par exemple séparées angulairement de plus de 30 degrés) n'ont jamais pu interagir dans le passé. Il y a là un paradoxe : comment des régions primitives de l'Univers sans influence réciproque causale sont-elles parvenues aujourd'hui à la même température et à la même vitesse d'expansion, et cela à un millième près?

L'origine du rayonnement thermique cosmologique pose une autre énigme : si l'Univers est uniforme à l'échelle de plusieurs dizaines de millions d'années de lumière, il montre bien, à plus petite échelle, d'importantes inhomogénéités sous forme de galaxies et d'amas de galaxies. L'intensité du champ gravitationnel exercé par les plus grandes de ces inhomogénéités incite à penser que leurs précurseurs anciens auraient créé des anisotropies angulaires de l'ordre du degré, dans le rayonnement cosmologique en micro-ondes. Les astronomes cherchent actuellement à observer une telle anisotropie. Les traces d'anciennes disparités de direction dans la vitesse d'expansion universelle devraient aussi créer une anisotropie. On ne voit pas clairement quels mécanismes physiques auraient effacé les irrégularités pour que l'Univers ait sa structure actuelle.

Les cosmologistes essaient d'expliquer l'entropie et la structure à grande échelle de l'Univers, lesquelles semblent avoir déjà existé lorsque l'Univers était âgé de moins d'une minute. En fait, il vaut mieux définir de telles époques, non pas en unités de temps telles que minutes ou années, qui sont sujettes à corrections au fur et à mesure du raffinement des étalons de l'astronomie, mais plutôt en unités de décalage spectral qui expriment la « compression » primitive de l'Univers par rapport à ses dimensions actuelles.

Nous trouvons d'un côté les cosmologistes « chaotiques » qui, comme les biologistes, soutiennent que les propriétés de l'Univers résultent de processus évolutifs. Ils ont essayé de montrer qu'une sorte de sélection naturelle gravitationnelle a pu conduire à la structure à grande échelle actuelle, et que c'est là le résultat inévitable du lissage et du chauffage qui se sont poursuivis depuis le « big bang ». Si l'on pouvait démontrer que la structure actuelle aurait pu s'établir quelles que soient les condi-



5. L'« HORIZON » D'UN OBSERVATEUR est la partie de l'Univers contenant les événements qui peuvent avoir une action causale sur cet observateur. L'information ne pouvant pas être transmise à une vitesse supérieure à celle de la lumière, un observateur ne peut être affecté que par des événements à partir desquels la lumière a pu voyager jusqu'à lui depuis l'époque du « big bang ». Ici, O' correspond à la « singularité » par laquelle l'Univers est né et O correspond à l'époque actuelle. Le cône, au-dessous de O , représente l'horizon des événements sur Terre. Tandis que l'Univers poursuit son évolution, la Terre s'éloigne le long de l'axe des temps et le cône devient donc plus grand. La singularité a pu être si complexe que différentes parties de l'Univers auraient commencé leur expansion à des époques différentes. Par exemple, le « big bang » aurait pu se produire en B' avant de se produire en A' . Certaines régions de l'Univers (A , B), à en juger par le rayonnement reçu sur la Terre, ont la même température et la même vitesse d'expansion à mieux qu'un millième près. Pourtant, ces régions n'ont été connectées causalement à aucun moment de l'histoire de l'Univers. Ce fait crée un paradoxe : comment ces deux régions peuvent-elles être aussi semblables?

tions initiales, alors l'unicité de l'Univers serait établie, aussi bien en théorie qu'en réalité.

De l'autre côté nous trouvons les tenants de la cosmologie « paisible » qui, eux, ont largement recours aux conditions initiales pour expliquer la structure actuelle de l'Univers! Leur hypothèse est la suivante: lorsque l'Univers fut créé à la singularité, il possédait certains traits structuraux bien définis et préférentiels pour des raisons de cohérence, de stabilité ou d'unicité. Selon cette hypothèse, ce ne sont pas les processus évolutifs gravitationnels qui ont façonné la configuration d'ensemble de l'Univers; leur rôle s'est borné à donner forme aux sous-structures telles que les galaxies, les étoiles et les planètes. Une bonne partie des travaux théoriques en cosmologie des dix dernières années ont cherché à « trancher » entre ces deux cosmologies. La suite de notre étude va porter sur ces travaux.

L'importance de la gravitation

On pense maintenant que tous les phénomènes naturels sont régis, aux températures ordinaires, par quatre forces fondamentales: les forces gravitationnelles, les forces électromagnétiques, les interactions faibles et les interactions fortes (ou nucléaires). Ces forces, jointes à un petit nombre de paramètres additionnels tels que la masse des particules, déterminent les caractéristiques de la structure de l'Univers. En remontant dans le temps jusqu'à la singularité primitive de décalage spectral infini (ce qui représente un « voyage » de l'ordre de dix milliards d'années), nous constatons que chacune de ces quatre forces fondamentales a, à certains moments, surpassé les autres. Aujourd'hui la force qui régit la dynamique de l'expansion à grande échelle est la force gravitationnelle. Bien que l'attraction gravitationnelle de deux protons soit 10^{40} fois plus faible que leur répulsion électromagnétique, la gravité prend de plus en plus d'importance dans un système comprenant un nombre énorme de particules comme l'Univers. Dans l'Univers, le nombre de particules chargées positivement doit être égal au nombre de particules chargées négativement, de sorte que, dans l'ensemble, les interactions électromagnétiques (attractions et répulsions) se neutralisent et n'exercent pas, à grande distance, de forces notables sur de vastes régions. Mais la force de gravitation, qui est essentiellement attractive, joue un rôle fondamental dans les systèmes de grande masse: en effet, elle a un rayon d'action infini, elle s'exerce aussi bien sur les photons du rayonnement que sur les particules matérielles, et c'est son influence qui détermine la taille des objets les plus grands

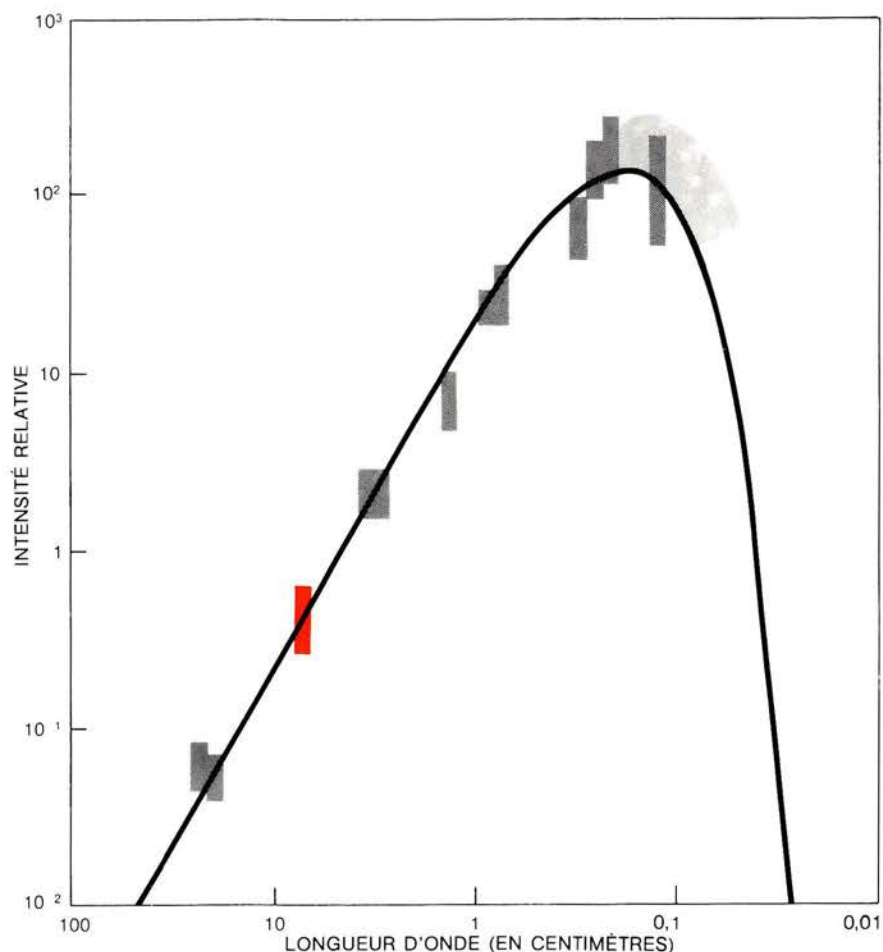
de l'Univers, comme les planètes, les étoiles, les galaxies et les amas de galaxies.

S'il s'est trouvé qu'une région locale de l'Univers primitif avait une densité supérieure à celle des régions avoisinantes, elle devrait attirer, par gravitation, plus de matière que les régions moins denses. Au cours de sa contraction sous l'effet de sa propre gravité, elle devrait devenir de plus en plus dense et ainsi attirer encore plus de matière. Ce qui n'était au départ qu'une fluctuation dans un Univers à peu près homogène devrait faire boule de neige et finalement devenir une énorme inhomogénéité! Il semble que les galaxies se soient formées à des époques correspondant à des décalages spectraux compris entre 10 et 100, et qu'elles se soient rassemblées en amas à des époques ultérieures. Mais on ne sait pas avec certitude si les galaxies se sont formées à partir de fragments inhomogènes appartenant à une inhomogénéité plus grande qui se serait désintégrée, ou à partir d'inhomogénéités plus petites qui se seraient rassemblées sous l'action de leur attraction mutuelle par gravitation.

La matière naît de perturbations

A une époque correspondant à un décalage spectral de 1 000 (environ 300 000 ans après le « big bang »), la pression gazeuse est plus forte que la gravité dans toute région de taille équivalente à celle d'environ 100 000 Soleils mais, pour des dimensions plus grandes, la gravitation est plus forte que la pression gazeuse. Les fluctuations d'ordre comparable à ces grandes dimensions grandissent puis s'effondrent pour former des objets liés par la gravitation, dont les masses s'échelonnent entre la masse des amas globulaires d'étoiles et celle des galaxies. Pour des décalages spectraux supérieurs à 1 000, la pression dominante n'est plus celle du gaz mais celle du rayonnement thermique; le comportement dynamique des perturbations de densité est alors déterminé par la force électromagnétique.

Dans de telles conditions, les photons forment un fluide visqueux qui inhibe le mouvement des électrons et des protons. Un électron, par exemple, diffuserait les photons incidents qu'il perçoit comme des impulsions électriques. En raison de la loi de



6. LE RAYONNEMENT EMIS PAR LE BIG BANG a été découvert aux fréquences micro-ondes en 1965 par Arno Penzias et Robert Wilson du Laboratoire Bell. Leurs mesures (région en couleur) ainsi que celles d'autres chercheurs (régions en gris), montrent que le spectre de ce rayonnement est celui d'un corps noir à la température absolue de 2,9 kelvins. Ce rayonnement est le même dans toutes les directions à un millièmme près.

conservation de la quantité de mouvement, cette diffusion ne modifie guère la trajectoire de l'électron. Le résultat final est que l'électron, emprisonné dans le champ de rayonnement par le barrage incessant des photons, ne peut aller nulle part. Mais une fois que l'électron s'est uni à un proton pour former un atome d'hydrogène, il ne subit plus l'influence des photons car il est alors soumis essentiellement au champ électrique du proton. Cette impossibilité du déplacement des électrons isolés signifie que les fluctuations de densité de

la matière, appelées fluctuations de densité isothermes, durent ainsi jusqu'au moment où les électrons et les protons se combinent pour former des atomes électriquement neutres. Ces atomes voyagent alors librement dans le champ de rayonnement et les processus de dilatation et d'effondrement gravitationnels peuvent se produire. Les fluctuations de densité isothermes commencent à s'effondrer lorsqu'elles ont acquis une masse supérieure à 100 000 masses solaires. Elle se rassemblent alors pour former des galaxies.

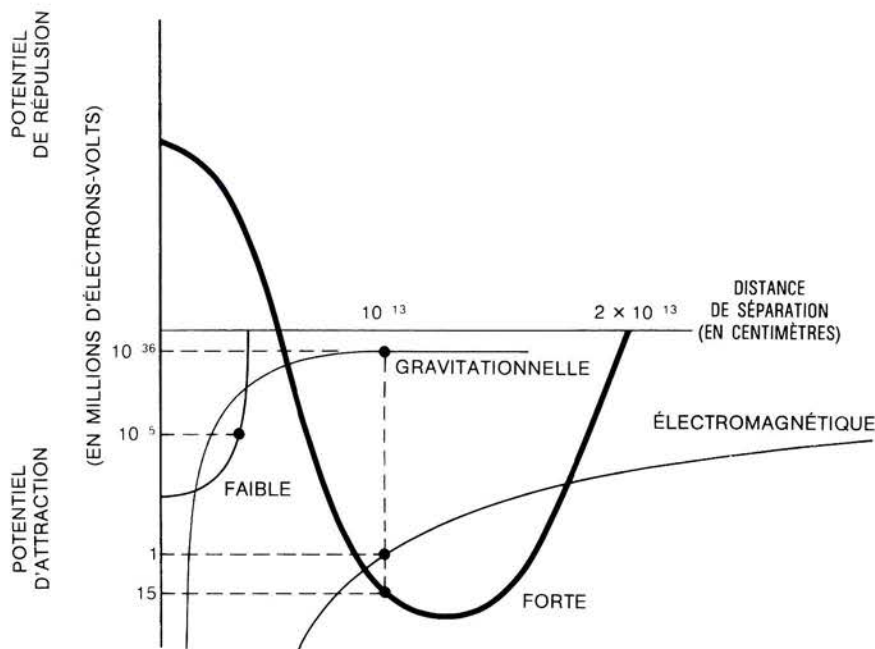
Des objets pourraient également se former à partir d'un autre type de perturbation, appelée fluctuation adiabatique, dans laquelle la matière et le rayonnement sont tous deux perturbés. Si la matière et le rayonnement étaient légèrement comprimés dans un espace limité, l'excès de pression produirait une sorte d'onde acoustique. Mais, de même que les ondes sonores dans l'air finissent par se dissiper, une onde sonore primitive subirait le même sort. La longueur et la masse critiques au-dessous desquelles l'onde serait complètement amortie sont fixées par l'aptitude des photons à s'échapper de la fluctuation adiabatique pendant le laps de temps écoulé depuis l'origine de l'Univers. Ainsi, à une époque correspondant à un décalage spectral de 1 000, seules survivent à cet amortissement les fluctuations adiabatiques de masse supérieure à celle que l'on observe pour de grandes galaxies ou pour des amas de galaxies. En d'autres termes, les fluctuations adiabatiques les moins massives disparaissent, tandis que les plus massives ont des chances de survivre, de grandir et finalement de s'effondrer sur elles-mêmes pour former des galaxies massives ou des amas de galaxies.

En résumé, cette reconstitution de l'évolution probable de l'Univers primitif à haute température est caractérisée par deux types de fluctuations de densité, isothermes et adiabatiques, qui en gros correspondent respectivement à un amas globulaire d'étoiles (ou à une galaxie naine) et à un amas de galaxies. Cette image constitue sans aucun doute une simplification grossière car, en général, une inhomogénéité quelconque serait plutôt formée de la réunion d'une composante isotherme et d'une composante adiabatique. De plus, les structures nouvellement formées pourraient fusionner ou se fragmenter sans qu'il ne reste la moindre trace de leur identité individuelle antérieure. Malgré ces réserves, les cosmologistes seraient mal avisés d'ignorer ce modèle simplifié car les ordres de grandeur des masses de ces deux types de fluctuations sont tout à fait comparables aux masses des objets dont ils essaient d'expliquer l'origine.

Les processus d'uniformisation

Poursuivons notre voyage dans le temps : à une époque correspondant à un décalage spectral de 10^{10} , c'est-à-dire lorsque l'Univers n'est âgé que de quelques secondes et que sa température est de 10^{10} kelvins, les processus physiques sont gouvernés par l'interaction faible. Cette interaction régit certaines désintégrations radioactives qui mettent en jeu un neutron libre ou un neutrino (le neutrino est une particule ponctuelle sans charge électrique et de masse

INTER-ACTION	SOURCE	QUANTUM DU CHAMP	INTENSITÉ RELATIVE (MAIN-TENANT)	PORTÉE (EN CENTI-MÈTRES)	MANIFESTATION	ÉNERGIE D'UNIFICATION (EN ÉLECTRONS-VOLTS)
ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE	CHARGE ÉLECTRIQUE	PHOTON	10^{-12}	∞	FORCES ATOMIQUES ET MOLÉCULAIRES ÉLECTRICITÉ	10¹¹ 10²³ 10²⁸
FAIBLE	LEPTONS MÉSONS	(W BOSONS)	10^{-14}	10^{-15}	DÉSINTÉGRATION RADIOACTIVE BÊTA	
FORTE	BARYONS MÉSONS	PION KAON	1	10^{-13}	FORCES NUCLÉAIRES	
GRAVITATIONNELLE	ÉNERGIE DE MASSE	(GRAVITON)	10^{-40}	∞	DYNAMIQUE DE LA MATIÈRE À GRANDE ÉCHELLE	



7. LES CARACTERISTIQUES DES QUATRE FORCES FONDAMENTALES qui régissent toute la physique de la matière et de l'énergie sont réunies dans le tableau du haut; la portée et l'intensité relative de ces forces sont données dans le diagramme du bas. Au-dessus d'un certain seuil d'énergie, appelée l'énergie d'unification, ces types d'interaction perdent leur individualité. Les particules subatomiques, dont on connaît plus de 200 espèces, sont affectées par au moins l'une de ces interactions. On distingue deux grandes catégories de particules : les hadrons (comprenant les protons, les neutrons et les pions), qui semblent avoir une structure interne, et les leptons (les électrons, les muons, les particules tau et les neutrinos qui leur sont associés), qui n'ont pas cette structure. Les hadrons sont subdivisés en baryons qui finissent par se désintégrer en protons, et en mésons qui se désintègrent en leptons et en photons (les quanta de rayonnement électromagnétique) ou en paires proton-antiproton.

négligeable). Aux époques correspondant à des décalages spectraux supérieurs à 10^{10} , l'interaction faible maintient les protons et les neutrons en équilibre thermique : il s'agit là d'un état statistique où le nombre des particules ayant des propriétés (position, masse, énergie, vitesse, spin, etc.) comprises dans un domaine spécifié reste constant, le taux de particules qui entrent dans ce domaine étant toujours égal au taux de particules qui en sortent. Lorsque des particules sont parvenues à un état d'équilibre thermique, leur comportement n'est plus du tout déterminé par leur histoire, mais uniquement par une série de lois statistiques dépendant de la température. Il en résulte qu'il est inutile de fouiller davantage dans leur passé pour comprendre le comportement et la proportion relative des protons et des neutrons.

L'interaction faible, jointe au modèle du « big bang » de l'expansion, prédit que l'abondance de l'hélium primitif dans l'Univers doit être comprise entre 25 et 30 pour cent. Cette prédiction, qui a maintenant été confirmée, constitue une vérification de la cosmologie du « big bang ». Le succès de cette prédiction signifie que quelques secondes après le « big bang », l'Univers était uniforme à grande échelle, au moins autant qu'il l'est aujourd'hui, et avait à peu près la même entropie. Les cosmologistes tentent maintenant de déterminer le degré d'uniformité aux époques antérieures.

Aux époques correspondant à des décalages spectraux supérieurs à 10^{10} , les neutrinos et leurs antiparticules (les antineutrinos) jouent un rôle important. Aujourd'hui ces particules sont presque « insaisissables » car elles n'interagissent pratiquement pas avec la matière raréfiée de notre Univers actuel. Pourtant, lorsque l'Univers était âgé d'un peu moins d'une seconde, la matière et le rayonnement étaient si denses que les neutrinos interagissaient fortement avec eux. A une époque correspondant à un décalage spectral de 10^{10} , un neutrino-type pouvait traverser une étendue notable de l'Univers avant d'entrer en collision avec une autre particule. Les neutrinos pouvaient donc transporter efficacement de l'énergie et de la quantité de mouvement sur des distances extrêmement grandes. Ils devaient réaliser ce transport en absorbant de l'énergie dans les régions de haute énergie de l'Univers, et en la transférant aux régions de basse énergie par des chocs occasionnels. Ainsi les neutrinos effaçaient toute inhomogénéité de la répartition de la matière : ces inhomogénéités pouvaient provenir de différences directionnelles dans l'expansion d'ensemble de l'Univers primitif.

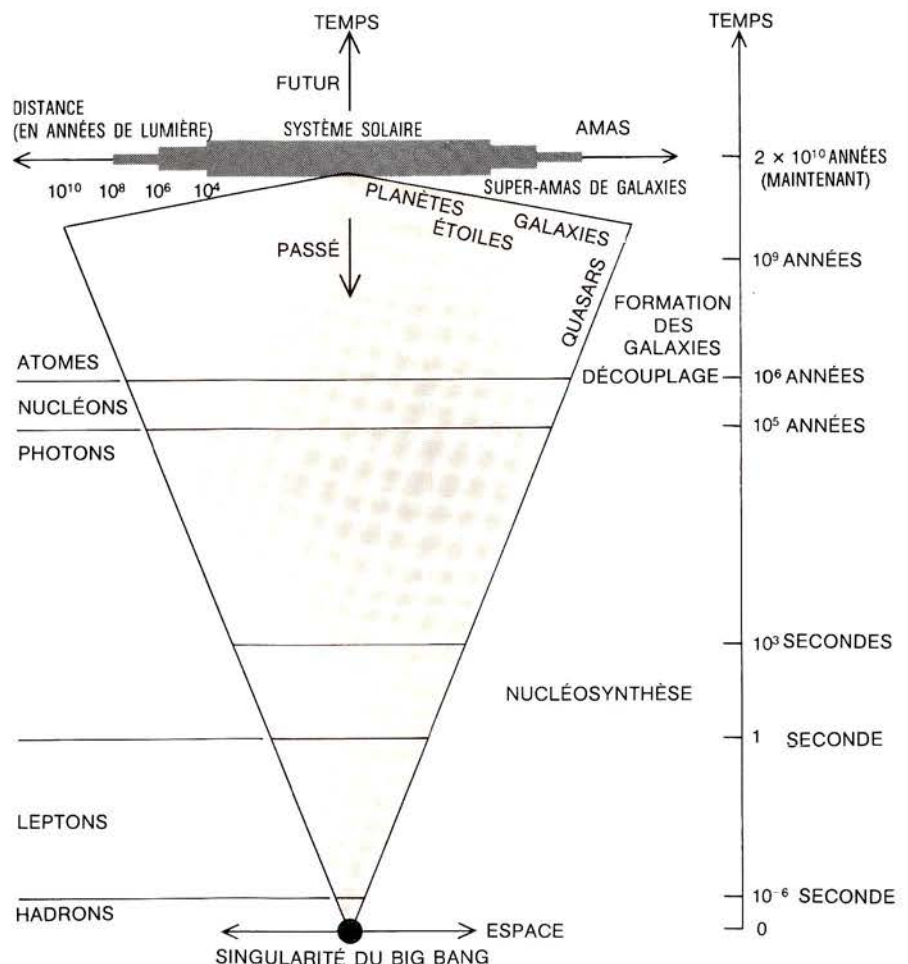
Cette possibilité d'uniformisation sous l'effet de processus de transport par des neutrinos a été évoquée en

1967 par Charles Misner de l'Université du Maryland; celui-ci espérait que ces processus auraient pu éliminer la plupart des irrégularités associées à la singularité initiale d'un Univers chaotique. Cet espoir s'est effondré car nous savons maintenant que si l'expansion initiale était suffisamment asymétrique, l'expansion de l'Univers serait si rapide que les neutrinos n'auraient pas le temps d'entrer en collision avec d'autres particules. En d'autres termes, un Univers qui serait à l'origine fortement anisotrope le resterait ! Il semble que les processus de transports par neutrinos et les autres mécanismes d'uniformisation ne peuvent « gommer » que les petites anisotropies. Quelle que soit l'efficacité postulée d'un processus d'uniformisation, il est toujours possible d'imaginer un modèle d'Univers qui serait resté néanmoins bien plus irrégulier que ne l'est l'Univers actuel. Ainsi les caractéristiques de l'interaction faible sont incompatibles avec le principe essentiel de la cosmologie chaotique selon lequel l'Univers actuel serait le résultat d'une évolution à partir d'un état initial quelconque, quel que soit son degré d'irrégularité.

Peut-être l'homogénéité de l'Univers est-elle le résultat de mécanismes d'uniformisation plus complexes, tels que l'ingénieux modèle du « mixeur » de C. Misner dans lequel la matière serait périodiquement mélangée par des explosions se propageant à la vitesse de la lumière, tantôt dans une direction et tantôt dans une autre. Ce mécanisme exotique et complexe a pour base la théorie de la relativité générale. La probabilité de telles explosions semble cependant être infime. En fait, les conditions requises pour un mélange de ce type sont à peu près aussi spéciales que les conditions nécessaires pour que l'Univers initial soit parfaitement uniforme. De sorte que le modèle du mixeur n'explique pas grand-chose. Les tenants de la cosmologie chaotique en sont donc à rechercher des processus d'uniformisation moins « pathologiques ».

Plus près du « big bang »

Il est maintenant temps de quitter l'époque de l'interaction faible pour nous approcher plus près de la singularité cosmologique et essayer d'explorer les premières millisecondes de



8. LE DIAGRAMME ESPACE-TEMPS de l'Univers retrace l'histoire de l'Univers depuis la singularité il y a environ 20 milliards d'années. La région grisée représente l'horizon d'un observateur hypothétique à la singularité. Chacune des interactions fondamentales a été, à une certaine époque, la force dominante régissant le comportement de la matière.

l'Univers. Nous atteignons là un domaine où la température et l'énergie des particules surpassent celles qui sont atteintes dans les plus puissants accélérateurs construits par l'homme et où la densité du rayonnement est comparable à la densité des noyaux atomiques : la force prédominante entre les particules est alors l'interaction forte. L'extrapolation de notre modèle à cette époque la plus primitive est assez osée car nous n'en comprenons pas entièrement les principes physiques de base. Lorsque l'interaction forte annihile un proton et un antiproton, elle donne naissance à deux photons de haute énergie jaillissant en sens opposés. Lors de la première milliseconde de l'histoire de l'Univers, la température devait être si élevée que de telles annihilations (ainsi que le phénomène inverse où des nucléons et des antinucléons se créent spontanément à partir de photons) devaient être fréquentes; aussi les nucléons et le rayonnement devaient être indiscernables. L'entropie moyenne de 10^8 photons par nucléon observée aujourd'hui indique que, lorsque s'est produite la dernière annihilation, il restait un proton survivant pour 10^8 photons créés par la destruction d'autres paires particules-antiparticules.

Juste avant que l'Univers ait atteint l'âge d'une milliseconde, il existait, selon toute apparence, une inégalité minime entre la matière et l'antimatière : 1,00000001 particule pour 1 antiparticule. Jusqu'à une date récente, l'origine de cette curieuse disparité était tout à fait mystérieuse, et cela en raison d'un principe

concertant les baryons (c'est-à-dire les particules lourdes, comme les nucléons, qui sont soumises à l'interaction forte). En effet, les physiciens pensaient que dans un système quelconque la différence entre le nombre des baryons et le nombre des antibaryons était absolument constante dans le temps. Aucune interaction entre particules, aucune transformation ne pouvait, semblait-il, modifier cette différence. Si ce principe est valable dans l'ensemble de l'Univers, cette asymétrie de 10^{-8} du rapport matière sur antimatière a dû s'établir dans la structure initiale du « big bang ».

Au cours des dernières années, les cosmologistes se sont vivement intéressés aux conséquences d'une nouvelle extension de la théorie de la matière, théorie selon laquelle les trois interactions (électromagnétique, faible et forte) sont unifiées à des températures suffisamment élevées. En effet, au-dessus de 10^{26} kelvins, ces forces perdent leur individualité, alors qu'aux températures plus basses, elles semblent être indépendantes (bien qu'elles soient en fait diverses manifestations d'une même force sous-jacente). Cette sorte d'unification n'est possible que si les quarks, qui sont les constituants des protons et d'autres particules élémentaires, peuvent se désintégrer. Une telle désintégration a alors une conséquence surprenante : le proton serait une particule instable, bien que sa durée de vie moyenne soit environ de 10^{31} ans! En dépit de la rareté des désintégrations de protons, les physiciens espèrent en observer dans les

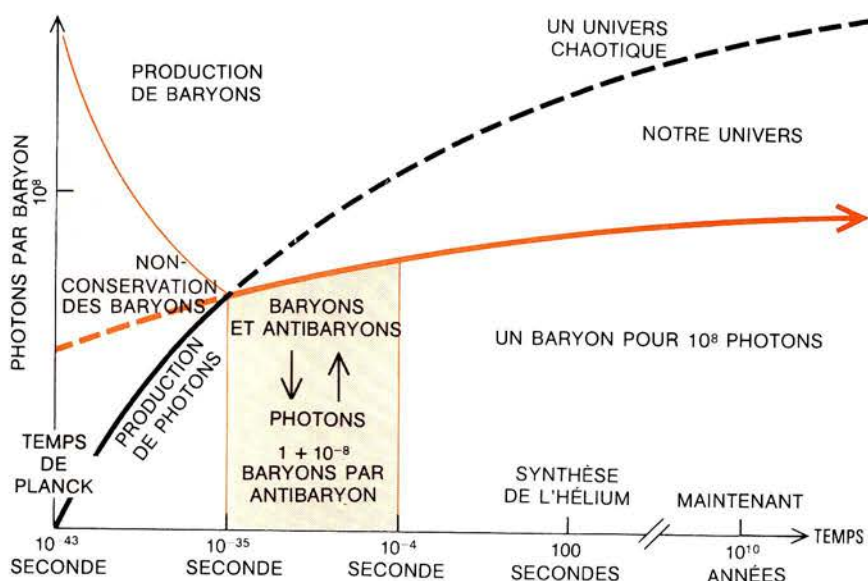
toutes prochaines années grâce à une expérience qui porterait sur une masse suffisamment grande : 1 000 tonnes de matière, contenant environ 10^{32} protons.

L'existence possible de phénomènes si inhabituels montre que, dans l'Univers, le taux d'asymétrie particules-antiparticules qui détermine l'entropie observée, n'est pas absolument invariant. Il peut changer radicalement dans la 10^{-35} seconde qui suit immédiatement la naissance de l'Univers, lorsque les processus responsables de la désintégration des protons sont abondants. De récents travaux montrent qu'après cet instant initial, le taux d'asymétrie particules-antiparticules se « fige » dans l'Univers et la valeur prédite est très voisine de l'asymétrie observée : 10^{-8} . Il n'est pas nécessaire que l'entropie observée dépende fortement des conditions initiales du « big bang » dans la première 10^{-35} seconde.

Le temps de Compton et le temps de Planck

Jusqu'à présent, nous n'avons pris en compte que les propriétés corpusculaires de la matière. Mais si l'on veut étudier ce qui s'est passé juste après le « big bang », il faut aussi considérer l'aspect ondulatoire de la matière. Selon la mécanique quantique, chaque particule se comporte comme une onde dont la longueur d'onde est égale au quotient de $2,1 \times 10^{-37}$ par la masse de cette particule. Cette longueur d'onde, que l'on appelle la longueur d'onde de Compton, est infiniment petite à l'échelle des conditions ordinaires actuelles, mais 10^{-23} seconde après le « big bang » (c'est le temps de Compton), la longueur d'onde de Compton d'un proton, 10^{-13} centimètre, serait égale à la dimension de la région connectée causalement dans l'Univers. Cependant, cette longueur particulière n'a rien de fondamental, car les protons eux-mêmes ne représentent rien de fondamental dans la mesure où ils possèdent une structure interne formée de quarks.

On atteint la barrière ultime à une époque voisine de 10^{-43} seconde après le « big bang » (c'est le temps de Planck) car les régions de l'Univers connectées causalement étaient alors comprimées à une échelle plus petite que la longueur d'onde de Compton de la totalité de leur masse. Au-delà de cette barrière, l'interprétation habituelle de l'espace-temps n'est probablement plus valable car les fluctuations quantiques dominent la géométrie de l'espace-temps. Il ne fait aucun doute que de nombreux secrets de l'Univers seraient percés si l'on comprenait les instants antérieurs au temps de Planck, mais, pour le moment, la possibilité d'y parvenir semble encore lointaine.



9. L'ÉVOLUTION THERMIQUE DE L'UNIVERS est figurée ici en termes de nombre de photons par baryon, rapport qui mesure l'entropie (le nombre d'états possibles pour un système). On sait peu de choses sur l'époque antérieure à 10^{-43} seconde, car dans les conditions qui prévalaient alors, la théorie de la relativité générale et la théorie de la mécanique quantique semblent se contredire. Avant 10^{-4} seconde, il existait un déséquilibre entre matière et antimatière : celui-ci a pu apparaître spontanément à environ 10^{-35} seconde. Si l'Univers avait été chaotique après 10^{-35} seconde, tout mécanisme d'uniformisation capable d'amener l'Univers à sa structure homogène actuelle aurait donné lieu à un nombre de photons par baryon très supérieur à celui que l'on observe aujourd'hui.

Pour cela il faudra probablement attendre une nouvelle théorie qui soit une synthèse de la relativité et de la mécanique quantique. A l'heure actuelle, les cosmologistes considèrent que le temps de Planck est en fait le moment de la création de l'Univers; l'existence d'une phase antérieure de l'évolution est pour eux une spéculation.

La période écoulée entre le temps de Planck et le temps de Compton est un peu plus accessible au travail théorique. La mécanique quantique indique alors un mécanisme qui pourrait avoir effacé les irrégularités de l'Univers. D'après la mécanique quantique, tout l'espace est rempli de paires particules-antiparticules « virtuelles ». Ces particules se matérialisent par paires, se séparent, se rejoignent et s'annihilent mutuellement; on les qualifie de virtuelles parce qu'on ne peut pas les observer directement au moyen de détecteurs de particules, mais on peut cependant mesurer leurs effets indirects. Si une paire de particules virtuelles est soumise à un champ de force extrêmement fort, ou

rapidement variable, ses deux composantes pourraient s'écarter l'une de l'autre si rapidement qu'elles ne pourraient plus se rejoindre. Dans ce cas, les particules virtuelles deviendraient réelles, leur masse étant fournie par l'énergie du champ de force. Aux instants proches du temps de Planck, le champ de force requis pourrait être engendré par les variations de la dynamique de l'expansion de l'Univers.

L'astrophysicien soviétique Ya. Zel'dovitch a suggéré que l'émission de particules réelles à partir de particules virtuelles pourrait effacer les défauts d'isotropie et d'homogénéité de la structure initiale de l'Univers. Le rayonnement et les particules seraient engendrés surtout dans les régions où l'énergie est excédentaire; les particules nouvellement créées transporteraient alors l'énergie des régions plus denses vers les régions moins denses. Elles auraient aussi pour effet d'uniformiser le taux d'expansion dans toutes les directions. De même qu'une personne qui monte sur un manège de chevaux de bois

tend à ralentir celui-ci, l'apparition soudaine de particules ralentirait la rotation et le mouvement des régions où elles se forment. Ce mécanisme de physique quantique est peut-être bien responsable de la structure homogène à grande échelle de l'Univers actuel.

L'évolution thermique de l'Univers

Tout au long de notre étude nous avons passé en revue plusieurs mécanismes d'uniformisation qui pourraient être responsables de la régularité actuelle de l'Univers: ainsi, le transport par neutrinos et la création de particules réelles à partir de particules virtuelles. Si prometteurs que paraissent ces mécanismes, nous pensons que leur action est fortement limitée et ceci en raison de considérations thermodynamiques. Comme l'entropie augmente toujours avec le temps, le niveau actuel de l'entropie de l'Univers, 10^8 , impose une limite supérieure à l'importance des proces-

TEMPS COSMIQUE	ÉPOQUE	DÉCALAGE VERS LE ROUGE	ÉVÉNEMENT	ANNÉES ÉCOULÉES
0	SINGULARITÉ	INFINI	BIG BANG	20×10^9
10^{-43} SECONDE	TEMPS DE PLANCK	10^{32}	CRÉATION DE PARTICULES	20×10^9
10^{-6} SECONDE	ÈRE HADRONIQUE	10^{13}	ANNIHILATION DES PAIRES PROTONS-ANTIPROTONS	20×10^9
1 SECONDE	ÈRE LEPTONIQUE	10^{10}	ANNIHILATION DES PAIRES ÉLECTRONS-POSITRONS	20×10^9
1 MINUTE	ÈRE RADIATIVE	10^9	NUCLÉOSYNTÈSE DE L'HÉLIUM ET DU DEUTÉRIUM	20×10^9
1 SEMAINE		10^7	RAYONNEMENT THERMIQUE ANTÉRIEUR À CETTE ÉPOQUE	20×10^9
10 000 ANNÉES	ÈRE DE LA MATIÈRE	10^4	L'UNIVERS SE "MATÉRIALISE"	20×10^9
300 000 ANNÉES	ÈRE DE DÉCOUPLAGE	10^3	L'UNIVERS DEVIENT TRANSPARENT	$19,9997 \times 10^9$
$1-2 \times 10^9$ ANNÉES		10-30	LES GALAXIES COMMENCENT À SE FORMER	$18-19 \times 10^9$
3×10^9 ANNÉES		5	LES GALAXIES SE GROUPEMENT EN AMAS	17×10^9
4×10^9 ANNÉES			NOTRE PROTOGALAXIE S'EFFONDRE	16×10^9
$4,1 \times 10^9$ ANNÉES			LES PREMIÈRES ÉTOILES SE FORMENT	$15,9 \times 10^9$
5×10^9 ANNÉES		3	LES QUASARS SONT NÉS ; LES ÉTOILES DE LA POPULATION II SE FORMENT	15×10^9
10×10^9 ANNÉES		1	LES ÉTOILES DE LA POPULATION I SE FORMENT	10×10^9
$15,2 \times 10^9$ ANNÉES			LE NUAGE INTERSTELLAIRE SE FORME	$4,8 \times 10^9$
$15,3 \times 10^9$ ANNÉES			EFFONDREMENT DE LA NÉBULEUSE PROTOSOLAIRE	$4,7 \times 10^9$
$15,4 \times 10^9$ ANNÉES			LES PLANÈTES SE FORMENT ; LES ROCHES SE SOLIDIFIENT	$4,6 \times 10^9$
$15,7 \times 10^9$ ANNÉES			LES PLANÈTES SE COUVRENT DE CRATÈRES	$4,3 \times 10^9$
$16,1 \times 10^9$ ANNÉES	ARCHÉZOÏQUE		FORMATION DES PLUS ANCIENNES ROCHES TERRESTRES	$3,9 \times 10^9$
17×10^9 ANNÉES			APPARITION DE LA VIE MICROSCOPIQUE	3×10^9
18×10^9 ANNÉES	PROTÉROZOÏQUE		UNE ATMOSPHÈRE RICHE EN OXYGÈNE SE CONSTITUE	2×10^9
19×10^9 ANNÉES			APPARITION DE LA VIE MACROSCOPIQUE	1×10^9
$19,4 \times 10^9$ ANNÉES	PALÉOZOÏQUE		PREMIERS FOSSILES	600×10^6
$19,55 \times 10^9$ ANNÉES			PREMIERS POISSONS	450×10^6
$19,6 \times 10^9$ ANNÉES			PREMIÈRES PLANTES TERRESTRES	400×10^6
$19,7 \times 10^9$ ANNÉES			FOUGÈRES, CONIFÈRES	300×10^6
$19,8 \times 10^9$ ANNÉES	MÉSOZOÏQUE		PREMIERS MAMMIFÈRES	200×10^6
$19,85 \times 10^9$ ANNÉES			PREMIERS OISEAUX	150×10^6
$19,94 \times 10^9$ ANNÉES	CÉNOZOÏQUE		PREMIERS PRIMATES	60×10^6
$19,95 \times 10^9$ ANNÉES			ACCROISSEMENT DES MAMMIFÈRES	50×10^6
20×10^9 ANNÉES			HOMO SAPIENS	1×10^5

10. LES ÉVÉNEMENTS MARQUANTS DE L'HISTOIRE de l'Univers sont rassemblés dans le tableau ci-dessus. L'échelle de temps des événements « anciens » est incertaine car on ne connaît pas avec précision l'âge de l'Univers. Il est donc préférable de dater ces événements en termes de décalages spectraux; ces décalages sont une

mesure du degré de compression de l'Univers en expansion. Aux vitesses extrêmement grandes, caractéristiques des temps proches du big bang, le décalage spectral est égal à $(1 + v/c)/(1 - v^2/c^2)^{1/2} - 1$, où v est la vitesse de la source de rayonnement et c la vitesse de la lumière (3×10^8 mètres par seconde).

sus de dissipation qui se sont déroulés dans le passé de l'Univers. L'effacement des anisotropies et des inhomogénéités de la structure initiale devrait convertir, d'une façon irréversible, l'énergie de ces irrégularités en énergie thermique. Le « lissage » du chaos primordial a dû engendrer du rayonnement, mais la faible intensité du rayonnement cosmologique en micro-ondes signifie que ce chauffage et cette homogénéisation ne peuvent pas avoir été arbitrairement élevés dans le passé.

En outre, il s'avère qu'en général,

le rayonnement thermique est d'autant plus important que les irrégularités disparaissent plus tôt après le « big bang ». La plupart des mécanismes de dissipation envisagés seraient efficaces juste après le « big bang ». Il en résulte que si l'Univers était né avec un degré d'irrégularité notable, l'entropie créée à la singularité aurait déjà, à ce moment, dépassé le niveau actuel. Peut-on alors définir le seuil d'irrégularité initiale tolérable? Les travaux de Barry Collins et de Stephen Hawking, de l'Université de Cambridge, montrent qu'un Uni-

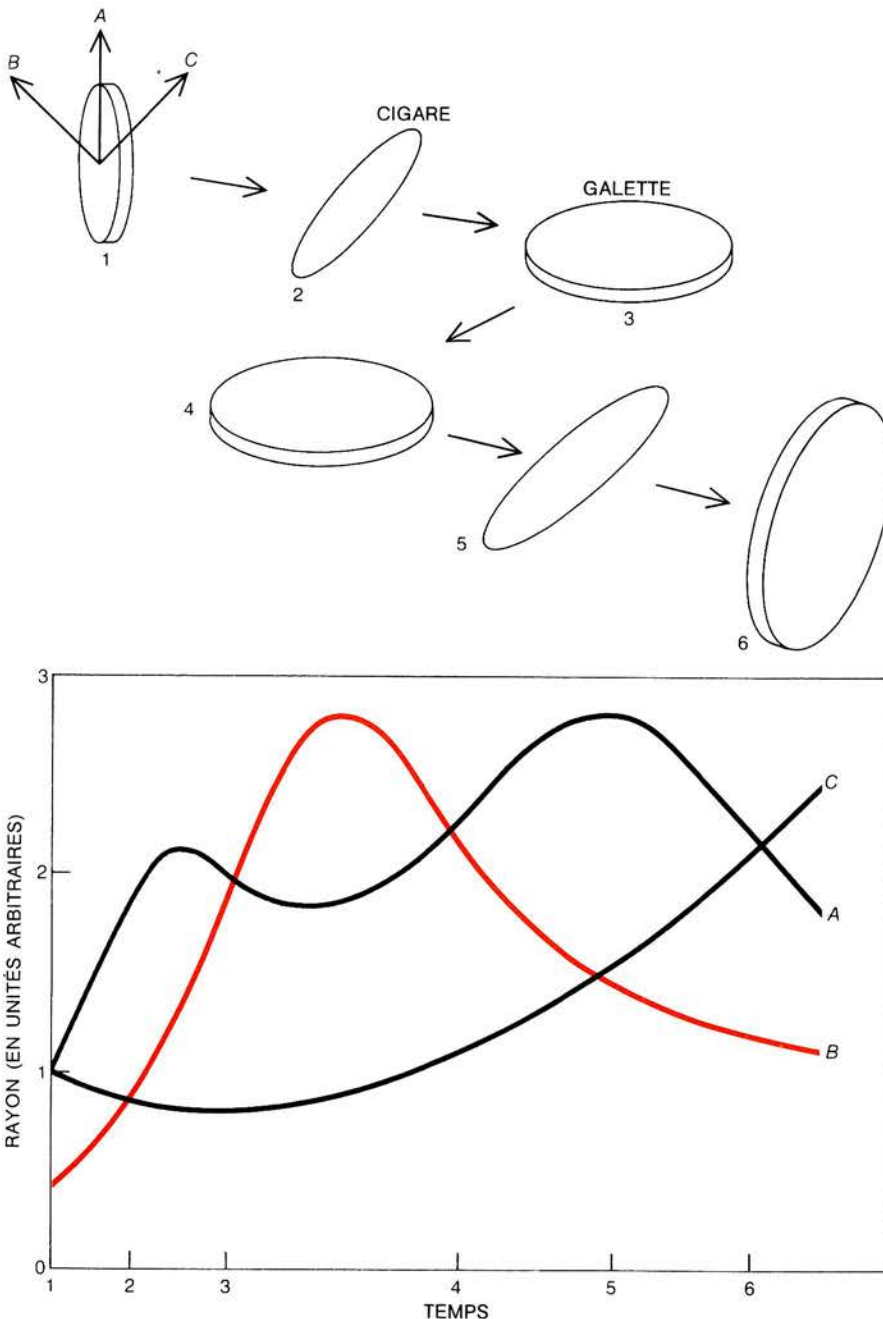
vers très régulier, mais pas parfaitement régulier, est instable. En effet, le plus petit écart à la régularité irait en s'aggravant avec le temps au cours de l'expansion de l'Univers, quels que soient les mécanismes d'uniformisation. En d'autres termes, si l'Univers n'est pas parfaitement homogène au début de son expansion, cette inhomogénéité ne peut que s'amplifier. Tout ceci signifie que les irrégularités initiales ne peuvent avoir été qu'infinitésimales. Nos travaux indiquent qu'il y a dans l'Univers une hiérarchie d'irrégularités : lorsqu'on examine des volumes d'espace de plus en plus grands, le degré d'irrégularité diminue, ce qui donne à penser que les irrégularités initiales n'étaient que des fluctuations statistiques dans un état régulier.

Le niveau actuel d'entropie montre donc que l'Univers a, semble-t-il, évolué d'une façon extrêmement régulière, même quand on remonte jusqu'à l'époque où il était âgé de 10^{-35} seconde. Nous ne savons à peu près rien de ce qui s'est passé avant cette époque, car les processus mettant en jeu la non-conservation de la symétrie particule-antiparticule et les propriétés quantiques du champ de gravitation ont effacé toute « mémoire » de l'entropie par nucléon initiale. Bien que la dissipation du chaos primitif ait pu engendrer aussi beaucoup de photons, des nucléons auraient été également créés et le rapport du nombre de photons au nombre de nucléons a pu augmenter ou diminuer. L'entropie totale de la matière et du rayonnement dans l'Univers doit, bien sûr, toujours augmenter.

Le problème des conditions initiales

Les conditions initiales sont-elles uniques, ou bien une autre série de conditions aurait-elle pu conduire au même résultat? On n'a pas encore répondu à cette question. Les théoriciens ont avancé plusieurs hypothèses : l'une d'elles est que l'interaction forte a maintenu la matière dans un état très rigide au moment de la singularité. A des densités extrêmement élevées, deux nucléons pourraient se repousser mutuellement, comme le font deux pôles magnétiques de même signe. Une telle répulsion, qui empêcherait la condensation des noyaux lourds, pourrait arriver à dominer entièrement le comportement des particules interagissantes. Un état primitif dans lequel prédominerait l'interaction forte resterait ainsi tout à fait régulier, car la pression serait assez élevée pour empêcher la formation de distorsions ou de turbulences lors de l'augmentation de la densité.

Une autre possibilité, étudiée par



11. LE MODELE « MIXEUR » DE L'UNIVERS proposé par Charles Misner de l'Université du Maryland, est un modèle cosmologique complexe compatible avec la théorie de la relativité générale. L'Univers du type mixeur est une boule de fluide qui se dilate en passant par une série de formes en « cigare » ou en « galette » d'orientations aléatoires. Lorsque l'Univers se dilate dans une direction, il se contracte dans une direction perpendiculaire (*en haut*). La variation en fonction du temps des rayons selon trois axes orthogonaux A, B, C exprime le passage de la forme galette à la forme cigare quand l'Univers augmente de volume (*en bas*). Les nombres portés sur l'axe des temps correspondent aux six formes.

Roger Penrose de l'Université d'Oxford, est fondée sur l'idée que le champ gravitationnel d'ensemble de l'Univers a lui-même une entropie proportionnelle à son uniformité et dépendante de cette uniformité. Puisque l'entropie gravitationnelle, comme toutes les autres formes d'entropie, ne peut aller qu'en augmentant, l'état initial de l'Univers devait avoir une faible entropie gravitationnelle. Pour que cette entropie soit faible, l'Univers a dû acquérir une configuration régulière et isotrope, comme le fait une bulle de savon qui minimise l'entropie associée à sa surface en prenant une forme sphérique isotrope. Au cours du vieillissement et de l'expansion de l'Univers, l'entropie gravitationnelle augmenterait, ce qui correspondrait à la formation d'inhomogénéités comme les galaxies et les amas.

On a imaginé d'autres conditions initiales de l'Univers en faisant appel au principe de Mach : d'après ce principe, le mouvement d'un objet n'est pas déterminé par les caractéristiques d'un certain espace géométrique « absolu » mais uniquement par le contenu matériel de l'Univers. Ce principe a été énoncé pour la première fois par Ernest Mach en 1893 dans sa critique du concept de Newton d'un espace absolu auquel devaient se référer les mouvements de tous les objets. Bien que le principe de Mach ne soit pas une conséquence de la théorie de la relativité, on l'a introduit dans cette théorie, soit en tant que condition aux limites dans les équations relativistes, soit en tant que « crible » pour éliminer des solutions physiquement inacceptables. Derek Raine de l'Université de Leicester a étudié en détail les conséquences de cette deuxième utilisation du principe de Mach; la conclusion de son travail est la suivante : l'Univers primitif devait être presque totalement isotrope et homogène!

La dernière possibilité que nous étudierons repose sur une toute autre idée : les conditions initiales seraient limitées par le seul fait qu'elles ont conduit à la vie humaine sur Terre. Cette idée, que l'on a baptisée principe cosmologique « anthropique », fut énoncée par G. Whitrow de l'Université de Londres, Robert Dicke de l'Université de Princeton et Brandon Carter de l'Observatoire de Meudon, puis développée par John Wheeler de l'Université du Texas à Austin. Voyons comment ce principe explique la dimension de l'Univers. Puisque l'Univers est en expansion continue, sa dimension dépend de son âge. Le principe cosmologique « anthropique » montre que l'Univers doit avoir inévitablement un diamètre d'environ dix milliards d'années de lumière. Si l'Univers était plus petit, il se serait écoulé trop peu de temps pour que la synthèse des éléments lourds essentiels à la vie humaine ait

pu s'effectuer par réaction thermonucléaire à l'intérieur des étoiles (ce qui demande des milliards d'années). Et si l'Univers était beaucoup plus grand, donc beaucoup plus âgé, les étoiles nécessaires à la création des conditions de la vie auraient depuis longtemps achevé leur évolution et auraient disparu par épuisement de leur combustible.

Le principe cosmologique « anthropique » s'appuie sur le niveau d'entropie de l'Univers : 10^8 . Si ce nombre était multiplié par un facteur de l'ordre de 1000, les protogalaxies seraient dans l'impossibilité de se condenser jusqu'à la densité nécessaire à la formation des étoiles. Or, sans étoiles, ni le système solaire, ni les éléments lourds de la matière vivante n'auraient été créés. Si l'Univers avait été initialement assez irrégulier, il aurait engendré, de manière irréversible, de grandes quantités de rayonnement thermique en raison des nombreux mécanismes producteurs d'entropie existant au moment de la singularité. Là encore, il en serait résulté une entropie et une pression de radiation trop fortes pour permettre la condensation des protogalaxies. Nous ne serions pas là pour voir un tel Univers! Ces idées insistent sur un fait : l'existence de l'homme impose une limite aux espèces d'Univers qu'il peut observer. Bien des traits de l'Univers, qui sont des sujets remarquables de réflexion, sont nécessaires pour que des observateurs aient pu exister.

Cette façon inhabituelle d'aborder ces problèmes a même été étendue à la valeur des constantes naturelles fondamentales. Considérons un changement dans l'intensité de la constante de couplage d'interaction forte, de quelques pour cent seulement. Une petite augmentation de l'ordre de 2 pour cent empêcherait la formation de protons à partir de quarks, et donc la formation d'atomes d'hydrogène. Une diminution du même ordre rendrait instables certains noyaux essentiels à la vie. Dans le même ordre d'idées, une petite variation de la charge électrique de l'électron rendrait toute chimie impossible et il n'existerait pas d'étoiles stables, donc pas de planètes.

Si le principe cosmologique anthropique explique pourquoi les caractéristiques structurales de l'Univers sont dans un certain sens des préalables nécessaires, il laisse dans l'ombre les raisons de cette structure. Quelle que soit l'appréciation que nous pouvons porter sur le caractère scientifique du principe de cosmologie anthropique, celui-ci pourrait bien avoir un impact significatif sur l'histoire des idées. Ce principe cosmologique abat en effet la barrière traditionnelle entre l'observateur et les objets observés : il fait de l'observateur une partie intégrante du monde macrophysique.

vient de paraître...



guide de l'astronome amateur

par Didier GODILLON
3^e édition corrigée,
complétée et mise à jour

Le seul ouvrage français traitant de la construction des instruments astronomiques par les amateurs. Le livre qui vous révèle ce qu'il faut savoir pour observer dans les meilleures conditions et avec toutes les chances de succès.

Un volume 18 x 25, 610 pages, 361 figures, cartes de la lune hors texte.
148 F (+ port 12 F)

rappel :

du même auteur :

atlas du ciel de l'astronome amateur

Un volume 18 x 25, 414 pages, 152 cartes, 18 figures, 120 F (+ port 12 F)

atlas photographique astronomique

par A. HECK et J. MANFROID
de l'Institut d'Astrophysique
de Liège

A ceux qui aiment l'astronomie cet ouvrage permettra de découvrir les astres les plus remarquables de l'univers photographiés par les meilleurs instruments. Il comprend 107 photos pleine page, format 16 x 23.

Un volume cartonné (16 x 23), 224 pages, 107 photos, 128 F (+ port 12 F)



maloine s.a. éditeur
27, rue de l'Ecole de Médecine
75006 PARIS

JEUX MATHÉMATIQUES

*Où l'on s'amuse avec des œufs
crus, cuits et mathématiques.*

par Martin Gardner

Pas tout à fait
sphérique
Blanc
Bizarrement fermé
Et sans couvercle

May SWENSON

Ainsi commence « Au petit déjeuner », un poème de huit stances baroques sur l'incision et la dégustation des œufs à la coque. Le poème se poursuit par : « Une plénitude de douceur / ici dans ma main / a-t-il glissé / de ma manche ? / La forme / de cette boîte / m'émerveille. »

Existe-t-il au monde une forme simple et naturelle qui enchante autant l'œil et la main que celle de l'œuf de poule ? L'une des extrémités de l'objet est plus pointue que l'autre et cette merveilleuse forme ovale varie beaucoup d'un œuf à l'autre. La forme d'un œuf de poule peut être simulée mathématiquement par un grand nombre de courbes fermées dont les équations sont de bas degrés. Les courbes les plus simples sont les ovales de Descartes, une famille d'ovales en forme... d'œuf découverte par le philosophe et mathématicien du XVII^e siècle. Comme les ellipses, certains ovales de Descartes

peuvent être facilement tracés avec deux punaises, un bout de ficelle et un crayon.

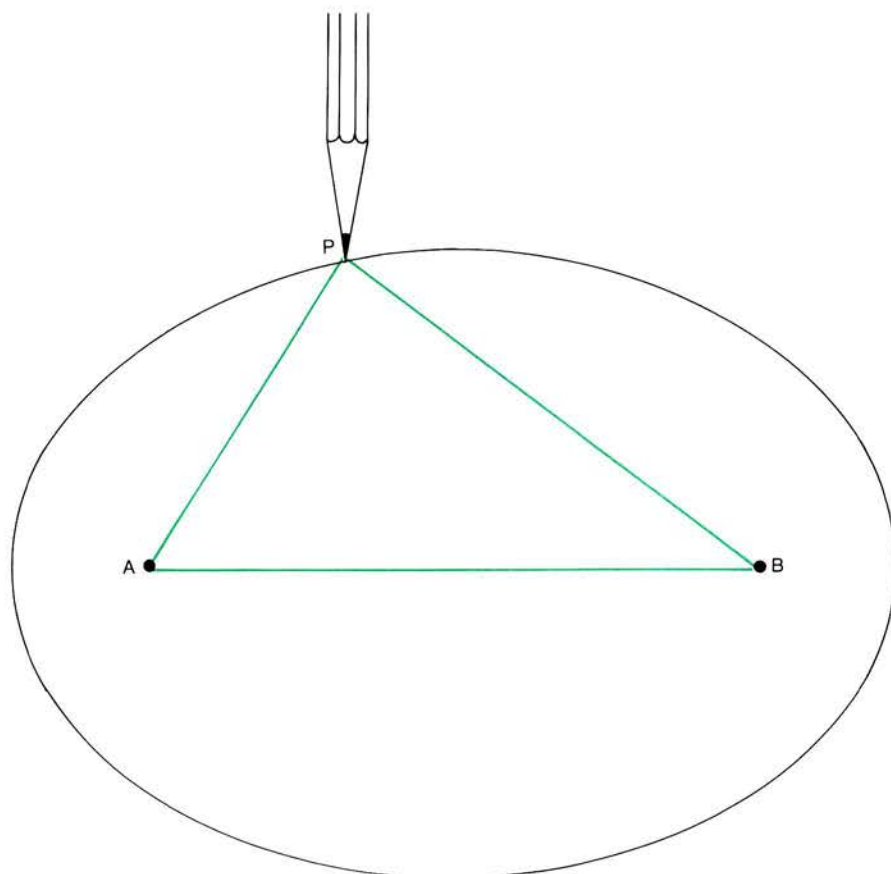
La figure 1 montre comment on peut tracer une ellipse par la méthode « du jardinier » : à l'aide du crayon, qui tracera la courbe, on maintient tendu le fil (de préférence en nylon pour diminuer les frottements) attaché en deux points par les punaises. Comme la somme des segments AP et BP de la figure ne peut varier, cette méthode nous assure que la courbe est bien le lieu des points dont la somme des distances aux deux foyers A et B est constante.

La figure 2 indique la façon de tracer un ovale de Descartes par une méthode analogue. Dans ce cas, le fil est attaché d'une part au crayon et d'autre part à la punaise A , et il fait une boucle autour de la punaise B . En maintenant le fil tendu, on peut tracer la moitié supérieure de l'ovale. On tracera la moitié inférieure par le même procédé, en inversant le sens d'enroulement du fil autour de B .

Cette méthode engendre ainsi une courbe qui est le lieu des points dont la distance à A ajoutée à deux fois la distance à B est constante. Descartes généralisa la courbe en considérant les cas où la somme de m fois la distance à A et de n fois la distance à B est constante, m et n étant deux nombres réels. L'ellipse et le cercle sont deux cas particuliers des ovales de Descartes. Pour l'ellipse m et n sont égaux à 1. Le cercle est une ellipse pour laquelle les deux foyers sont confondus.

Dans l'ovale de la figure 2, m est égal à 1 et n est égal à 2. En changeant la distance entre les foyers, la longueur du fil, ou les deux à la fois, il est possible de tracer une infinité d'ovales de Descartes : tous auront leurs facteurs multiplicatifs dans le rapport 1 : 2. La figure 3 montre comment construire une famille d'ovales de Descartes avec des facteurs multiplicatifs dans le rapport 2 : 3. Dans ce cas, un foyer est extérieur à l'ovale. Bien évidemment, la « technique du fil » ne marche que si m et n sont des entiers positifs suffisamment petits pour que la friction du fil enroulé autour des punaises n'entrave pas trop le tracé de la courbe.

De nombreux éminents physiciens, parmi lesquels Christian Huygens, James Maxwell et Isaac Newton, furent fascinés par les ovales de Descartes en raison de leurs étonnantes propriétés optiques de réflexion et de réfraction. En 1846, on lut devant la Société Royale d'Edimburgh un article de J. Maxwell intitulé *On the Description of Oval Curves and Those Having a Plurality of Foci* (De la description des courbes ovoïdes et de celles comportant plusieurs foyers). Le physicien écossais avait (indépendamment) redécouvert les ovales de Descartes. Il allait même



1. L'ellipse : $AP + BP$ est constant.

plus loin en généralisant ces courbes à celles comportant plus de deux foyers. J. Maxwell n'avait pas pu présenter lui-même cette note à la Société car, comme il n'avait que quinze ans, on le considérait comme trop jeune pour se produire devant une aussi éminente assemblée! (L'article du jeune J. Maxwell est inclus dans la réédition de l'éditeur Dover *The Scientific papers of James Clerk Maxwell*.)

Parmi les nombreux ovales ressemblant aux œufs, c'est-à-dire plus arrondis à l'une des extrémités qu'à l'autre, nous trouvons ensuite les célèbres ovales de Cassini. Un ovale de Cassini est le lieu des points dont le produit des distances à deux points fixes est constant. Les ovales de Cassini n'ont pas tous la forme d'œuf; lorsqu'ils sont ovoïdes, ils se présentent sous forme de deux ovales de directions opposées.

Les propriétés physiques des œufs de poules sont la source d'une grande variété de jeux de société divertissants. Bien que Pâques soit passé, vous n'aurez pas de mal à trouver des œufs! Essayez de faire les petites expériences qui suivent, vous verrez qu'elles sont à la fois très amusantes et scientifiquement bien instructives! (Peut-être même ces *eggspériences* vous plongeront-elles dans l'œuforie...)

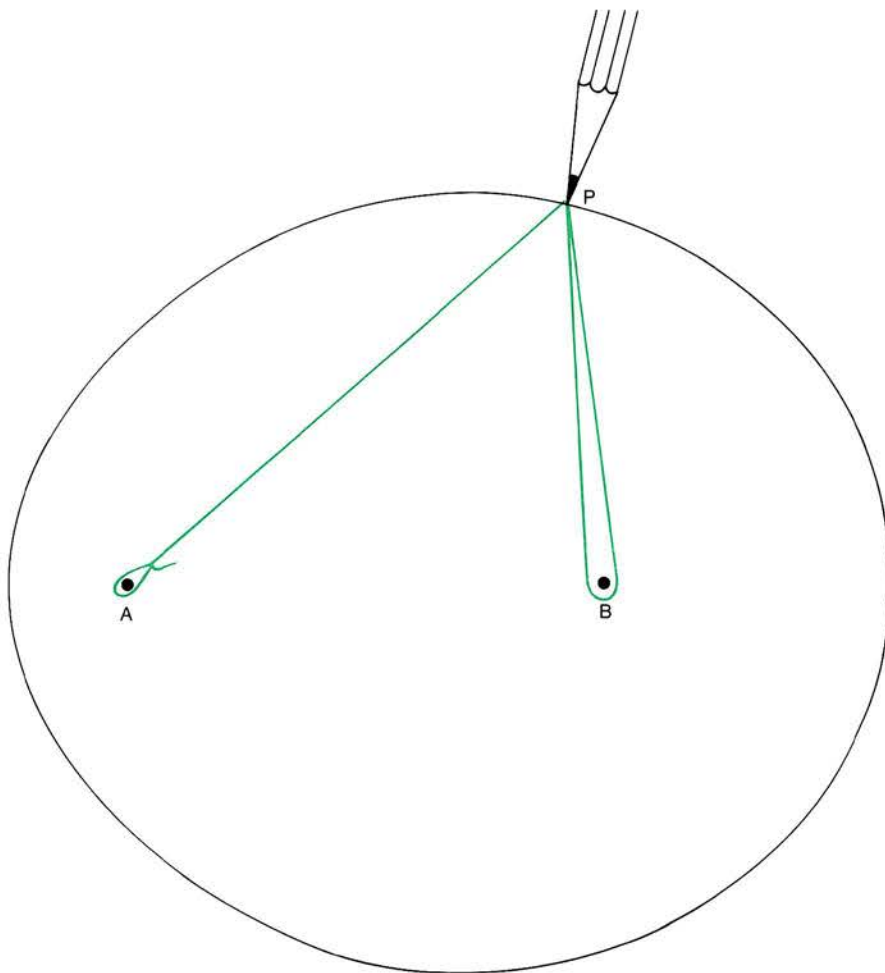
Le plus vieux tour utilisant des œufs est certainement celui qui consiste à faire tenir un œuf cru debout. On affirme que Christophe Colomb y arrivait en posant l'œuf suffisamment fermement pour que son fond s'écrase légèrement. Une façon beaucoup plus élégante de réaliser le tour consiste à placer une petite quantité de sel sur une table blanche, à mettre l'œuf en équilibre sur le sel, puis à souffler doucement tout le sel, sauf les quelques grains invisibles qui maintiendront l'œuf debout.

De fait, sur une surface rugueuse (comme un trottoir ou une nappe) il n'est pas difficile de mettre un œuf de poule cru en équilibre sur son extrémité la plus ronde: il vous suffit d'un peu de patience et d'une main bien ferme. De temps à autre, cette pratique devient une manie régionale. Ainsi, le numéro de *Life* du 9 avril 1945 rapporte l'engouement pour les équilibres d'œufs qui a saisi Chungking (ancienne capitale de la Chine nationaliste). Selon une légende chinoise, les œufs se tiennent mieux en équilibre le jour de Li Chun, premier jour du printemps dans le calendrier chinois.

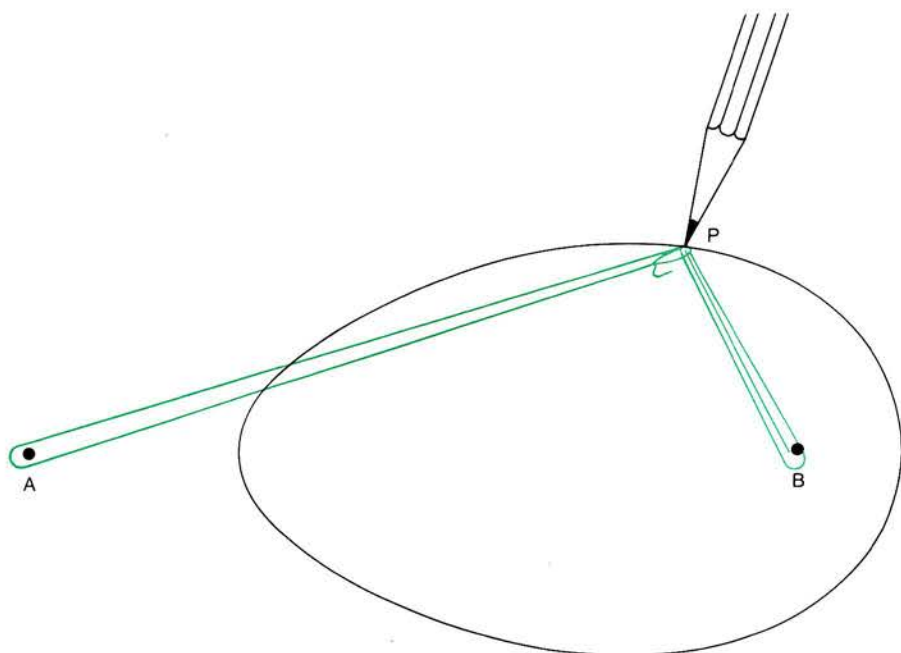
La figure 4 illustre un ancien et merveilleux tour d'équilibre d'œuf: celui-ci nécessite un bouchon, une bouteille et deux fourchettes. Commencez par creuser l'une des extrémités du bouchon de telle sorte qu'elle s'adapte parfaitement à l'œuf. Les fourchettes doivent être longues et posséder un manche assez lourd, le

rebord du goulot de la bouteille doit être plat comme celui de la plupart des bouteilles de jus de fruits. Même dans ces conditions idéales, il vous faudra peut-être beaucoup de temps pour obtenir un équilibre stable.

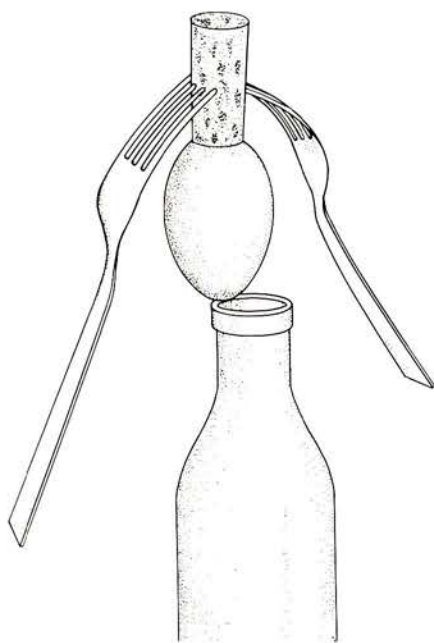
Comme l'œuf tombera probablement plusieurs fois avant que vous n'obteniez l'équilibre, entraînez-vous avec un œuf dur plutôt qu'avec un œuf cru! Cet équilibre précaire une fois obtenu, il semblera mystérieux à



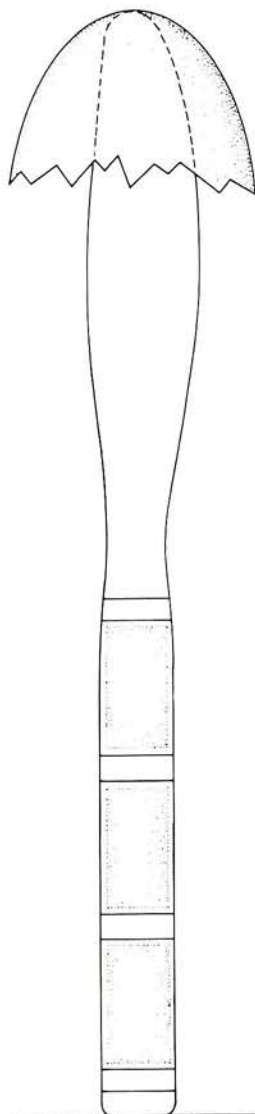
2. Oval de Descartes : $(AP) + 2 (BP)$ est constant.



3. Oval de Descartes : $2 (AP) + 3 (BP)$ est constant.



4. Comment faire tenir un œuf en équilibre sur une bouteille.



5. Comment briser une coquille d'œuf grâce à l'inertie d'un couteau.

quiconque n'est pas familiarisé avec les lois physiques du centre de gravité.

L'équilibre de l'œuf est le secret du gain d'un jeu très ancien. Ce jeu nécessite un grand nombre d'œufs pratiquement identiques. Deux joueurs posent chacun à leur tour un œuf sur une table ronde ou carrée. Le perdant est celui qui ne peut poser son œuf sans en déplacer un autre. Le premier joueur peut toujours gagner en posant son œuf verticalement sur une extrémité au centre de la table. A chaque coup il lui suffira de poser son œuf symétriquement (par rapport au centre) à celui de son adversaire.

Le contenu d'un œuf cru étant un fluide visqueux, il est difficile de le faire tourner longtemps sur ses côtés et impossible de le faire tourner sur ses extrémités. Cela donne un moyen rapide permettant de distinguer un œuf cru d'un œuf dur : seul l'œuf dur peut pivoter sur son extrémité. Le « tour d'œuf » suivant est moins connu : faites tourner, le plus rapidement possible, l'œuf sur son côté, puis arrêtez-le brusquement en posant votre index dessus. Otez alors rapidement le doigt. L'inertie du liquide interne en rotation fera encore tourner lentement l'œuf.

Un de mes amis magicien, Charlie Miller, aime présenter un tour surprenant avec un œuf dur. Il explique que l'œuf peut tourner sur son côté (il le fait tourner doucement sur le côté) mais également tourner sur ses extrémités (ce qu'il démontre), mais que seul un magicien peut produire ces deux types de rotation au cours d'une seule et même manœuvre. A ce moment il fait tourner rapidement l'œuf sur son côté. La plupart des œufs (en particulier ceux que l'on maintient droit durant la cuisson) tourneront un moment puis se mettront soudainement en rotation verticale. (Vous trouverez l'explication de ce curieux phénomène dans la rubrique *Expériences d'amateur*, par Jearl Walker, dans *Pour la Science* n° 26, décembre 1979.)

Le plus remarquable de tous les tours de rotation d'œuf est difficilement réalisable, probablement parce qu'il suppose beaucoup de pratique ; il est plus facile à apprendre de quelqu'un qui vous le montre qu'à partir d'un texte imprimé. Pour réaliser ce tour vous aurez besoin d'une assiette plate à bord plat. Sur une coquille d'œuf, découpez un disque dont la taille sera environ celle d'une pièce de un franc. Ce morceau doit être découpé sur le côté de l'œuf et non sur une extrémité, et la bordure de l'entaille doit être déchiquetée.

Plongez l'assiette dans l'eau, placez le morceau de coquille sur le bord de l'assiette et inclinez l'assiette comme cela est montré sur la figure 6. La coquille va commencer à tourner. Si maintenant vous tournez l'as-

siette dans votre main tout en gardant la même inclinaison, à votre grand étonnement, la coquille pivotera rapidement tout en se déplaçant le long du rebord humide de l'assiette. Pour y arriver, vous devrez tester différentes coquilles jusqu'à ce que vous en trouviez une dont l'équilibrage et la concavité soient adéquats. Une fois que vous aurez acquis le tour de main, il vous sera facile de reproduire à volonté cet amusant tour de force. Bien que ce tour soit décrit dans les vieux livres de prestidigitation, peu de magiciens semblent le connaître.

L'inertie explique bien le mystère du tour suivant. Prenez un couteau de cuisine pointu, tenez-le verticalement et posez une demi-coquille d'œuf sur la pointe comme il est indiqué sur la figure 5. Donnez le couteau à quelqu'un et défiez-le de percer la coquille en frappant le manche sur une table ou une pailasse d'évier. Chaque fois que cette personne essaiera, la coquille rebondira sans dommage, alors que vous, vous la percerez à volonté ! Le secret de la réussite est de tenir la lame de façon lâche dans la main. Faites comme si vous frappiez le manche sur la table, alors qu'en réalité vous laissez tomber le couteau de son propre poids de sorte qu'il cogne la table et rebondisse. Ce rebond imperceptible projette la pointe du couteau à travers la coquille.

La coquille entourant un œuf cru est remarquablement solide. Comme vous le savez certainement, si vous serrez dans vos mains un œuf (les extrémités de celui-ci touchant le centre de vos paumes) il est pratiquement impossible de briser l'œuf par écrasement. Mais ce que l'on sait moins, c'est qu'il est tout aussi difficile de briser un œuf cru en le lançant en l'air et en le laissant retomber dans l'herbe ! Le numéro du 18 mai 1970 du *Time* décrit toute une série de telles expériences qui se déroulèrent à Richmond en Angleterre à l'initiative du proviseur d'un lycée. On vit ainsi un pompier de la ville lâcher des œufs crus du haut de la grande échelle (plus de 20 mètres) sur du gazon. Sept sur dix en réchappèrent ! Un officier de la *Royal Air Force* aux commandes d'un hélicoptère fit un lâcher d'œufs de 50 mètres sur la pelouse de l'école. Trois œufs seulement sur 18 se cassèrent. Le *Daily Express* en vint à louer un Piper Aztec pour bombarder un champ, à 250 kilomètres à l'heure, avec cinq douzaines d'œufs. Eh bien, trois douzaines d'œufs survécurent ! En revanche, lorsque les œufs étaient précipités dans la Tamise du haut du pont de Richmond, les trois quarts d'entre eux éclataient. Cela prouve, comme disait le professeur de sciences naturelles « que l'eau est plus dure que l'herbe mais moins dure que le béton ».

La fragilité de l'œuf (lorsqu'il tombe sur une surface dure) fait l'objet d'une ancienne comptine sur Humpty-Dumpty reprise par Lewis Carroll dans *A Travers le Miroir*. On en trouve également une application dans la plaisanterie suivante : pariez un franc à quelqu'un qu'il ne pourra passer le pouce et l'index au-dessus du gond supérieur d'une porte et tenir entre ces deux doigts pendant 30 secondes un œuf cru de l'autre côté. Dès qu'il tiendra solidement l'œuf que vous aurez mis entre ses doigts, placez son chapeau sur le sol, juste sous l'œuf et... allez vous-en!

Le meilleur de tous les tours scientifiques utilisant un œuf est bien connu : c'est celui dans lequel la pression de l'air fait passer un œuf dur « épluché » dans le goulot d'une bouteille de lait en verre et le fait ressortir sans l'endommager. Le goulot de la bouteille doit être juste un tout petit peu plus étroit que l'œuf; par conséquent, vous prendrez soin de n'utiliser ni de trop gros œufs, ni une trop petite bouteille. Il est impossible de pousser l'œuf à l'intérieur de la bouteille. Pour faire passer l'œuf à travers le goulot, vous devez chauffer l'air contenu dans la bouteille. Le plus simple est de placer la bouteille dans l'eau bouillante pendant quelques minutes. Posez l'œuf debout sur le goulot et retirez la bouteille du feu. Au fur et à mesure que l'air contenu dans la bouteille se refroidit, il se contracte, créant ainsi un vide partiel qui aspire l'œuf dur vers l'intérieur. Il s'agit maintenant de faire ressortir l'œuf : retournez la bouteille pour que l'œuf tombe dans le col de celle-ci. Portez le goulot à votre bouche et soufflez vigoureusement; cela comprimera l'air dans la bouteille. Lorsque vous arrêterez de souffler, l'air se détendra, poussant ainsi l'œuf à travers le goulot. Vous n'avez plus qu'à le recueillir dans la main!

Encore plus fort : l'œuf est maintenant muni de sa coquille intacte. Plusieurs livres anciens conseillent la manipulation suivante : trempez l'œuf quelques heures dans du vinaigre chaud jusqu'à ce que la coquille se ramolisse. Faites alors rentrer l'œuf dans la bouteille par la méthode précédemment décrite et laissez-le tremper toute une nuit dans de l'eau froide. La coquille durcit à nouveau. Il ne vous reste plus qu'à vider l'eau et vous surprendrez tous vos amis en leur montrant cette curiosité. (Cependant, je dois avouer que je n'ai jamais réussi à réaliser ce tour. La coquille se ramollit effectivement, mais elle semble devenir poreuse, ce qui empêche la dépression de se produire. Ami lecteur, toi qui arriveras à introduire dans la bouteille l'œuf traité au vinaigre, seras-tu assez aimable pour m'écrire comment tu as fait?) Indépendamment de la faisabilité de ce tour, l'échec de sa réalisation constitue le nœud d'une des

meilleures (et des plus drôles) nouvelles de Sherwood Anderson. Elle est intitulée *The Egg* (l'œuf); vous la trouverez dans son livre *The Triumph of the Egg*.

L'histoire est racontée par un petit garçon. Ses parents, qui autrefois possédaient une misérable basse-cour, ont acheté un restaurant sur la route menant à la gare de Pickleville, un village pas très éloigné de Bidwell dans l'Ohio. Son père se prend pour un artiste. La scène se passe par une nuit pluvieuse; il n'y a qu'un client dans le restaurant, un dénommé Joe Kane, un jeune homme qui attend un train de nuit. Le père décide de le distraire en lui montrant son tour favori avec un œuf.

« Je vais cuire cet œuf dans ce bain de vinaigre, dit-il à Joe. Puis je vais le faire passer à travers le goulot de cette bouteille sans casser la coquille. Lorsque l'œuf sera à l'intérieur de la bouteille, il retrouvera sa forme normale et la coquille deviendra aussi dure qu'avant. Alors je vous donnerai la bouteille avec l'œuf à l'intérieur. Vous pourrez l'emporter avec vous où que vous alliez. Les gens voudront savoir comment vous avez introduit l'œuf dans la bouteille. Ne leur dites surtout pas. Laissez-les deviner. C'est cela qui est amusant avec ce tour. »

Lorsque le père se met à ricaner et à cligner des yeux, Joe se dit que l'homme doit être un peu dingue mais inoffensif. Le vinaigre ramollit bien la coquille d'œuf, mais le père oublie un point essentiel du tour. Il n'a pas pensé à chauffer la bouteille.

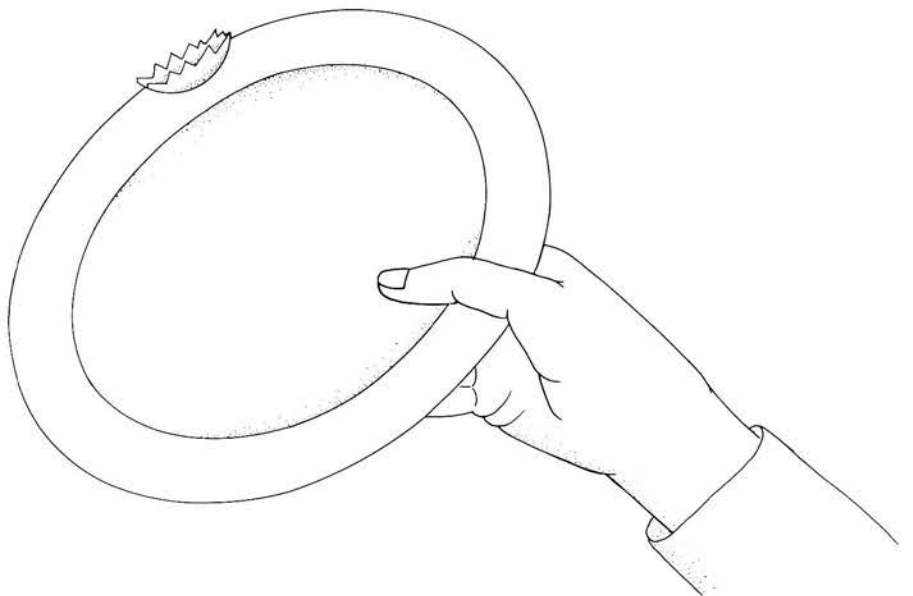
« Pendant un long moment il lutta pour essayer de faire passer l'œuf à travers le goulot... Il poussa et força jusqu'à ce qu'il fut saisi par l'énergie du désespoir. Lorsqu'il comprit enfin que le tour allait rater, le train attendu arrivait en gare et Joe Kane prenait nonchalamment la porte. Le

père fit un dernier effort désespéré pour dompter l'œuf rebelle et lui faire réaliser l'exploit qui établirait sa réputation : quelqu'un sachant distraire la clientèle qui venait dans son restaurant. Il harcelait l'œuf, il essayait d'être grossier avec lui, il jurait, la sueur perlait à son front... et l'œuf se cassa dans sa main. Lorsque le contenu gicla sur ses vêtements, Joe Kane, qui s'était arrêté à la porte, se retourna et rit. »

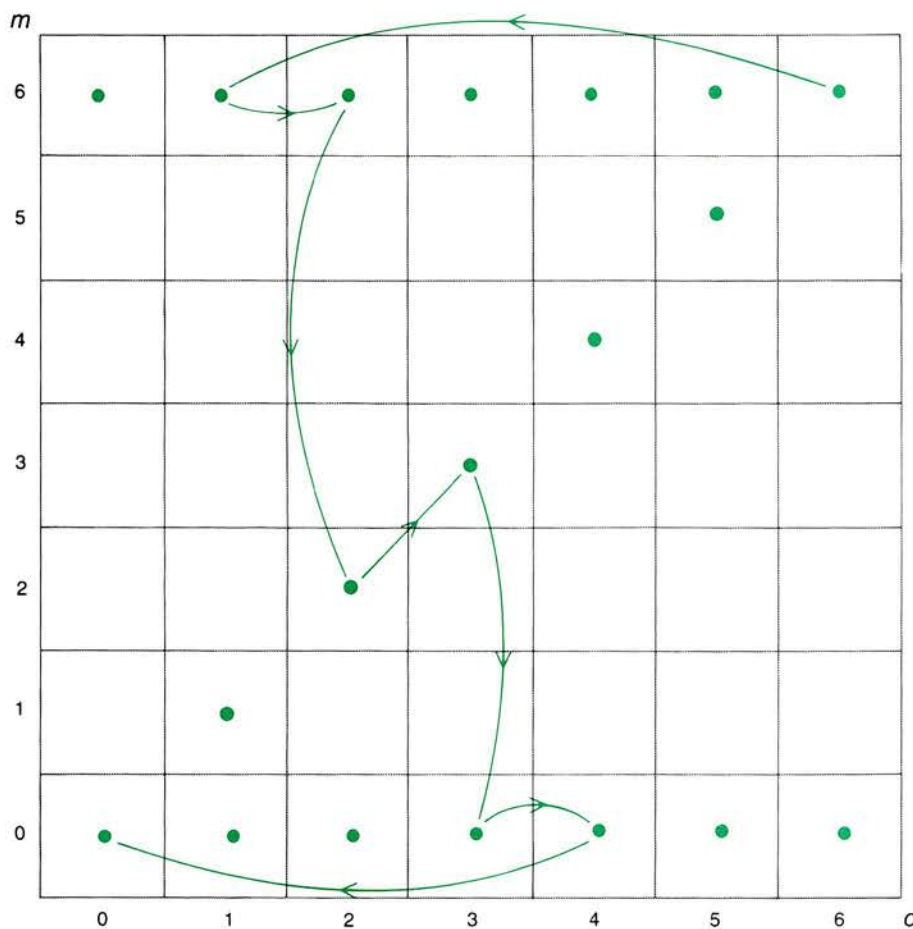
Rugissant de fureur, le père se saisit d'un autre œuf et le lance sur Joe, le ratant de très peu. Alors il ferme le restaurant et monte à l'étage où sa femme et son fils ont été réveillés par le bruit. Il a un œuf dans la main et un éclair de folie dans le regard. Il pose doucement l'œuf sur la table de chevet et se met à sangloter. Le fils, s'associant au chagrin de son père, pleure avec lui.

Les bonnes histoires ont toujours un caractère allégorique. Dans celle-ci, que représente l'œuf? Je pense que c'est la nature, l'Œuf Orphique, le monde immense, indépendant de notre pensée, libre de se soumettre ou non à nos désirs. Si vous comprenez ses lois mathématiques, vous pouvez en contrôler les forces à un degré incroyable, comme le font la science et la technologie moderne. Échouez dans la compréhension de ses lois, oubliez-les ou ignorez-les, alors la nature peut être aussi malveillante que Moby Dick la baleine blanche ou que l'œuf blanc de la tragédie de S. Anderson.

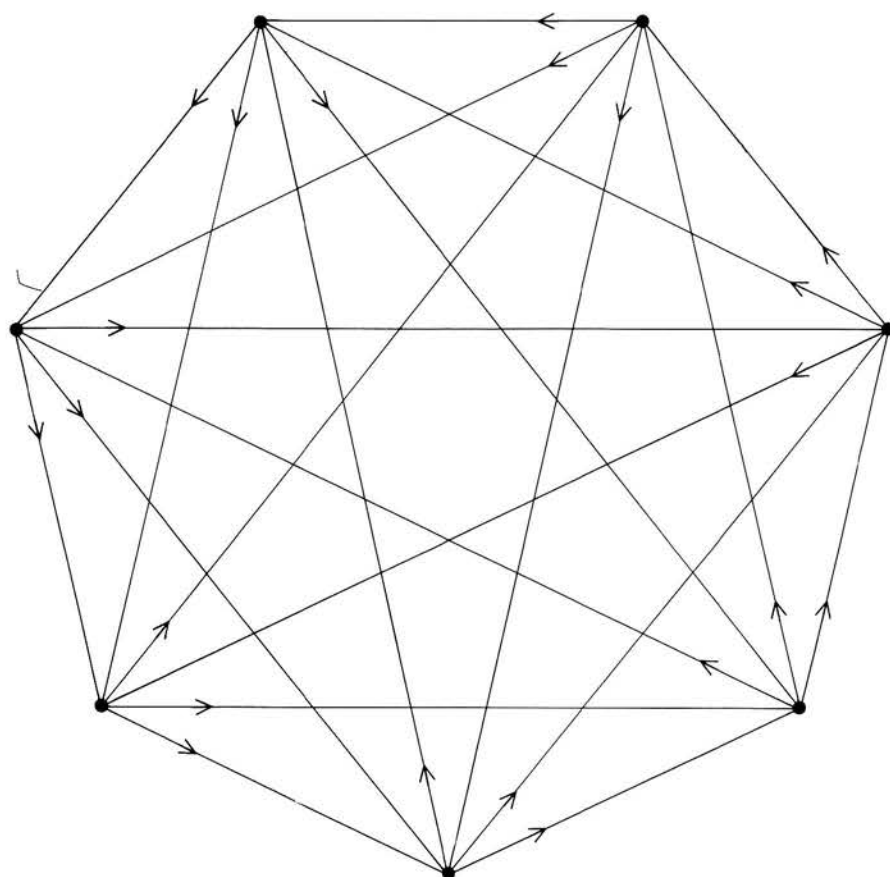
Un œuf est un œuf. C'est un petit objet naturel avec une belle surface géométrique. C'est un microcosme qui obéit à toutes les lois de l'Univers. Et, en même temps, c'est quelque chose de bien plus complexe et mystérieux qu'un galet blanc. C'est une étrange boîte sans couvercle qui renferme le secret de la vie lui-même.



6. Comment faire tourner une coquille d'œuf sur le rebord d'une assiette.



7. Une solution en sept traversées du problème des cannibales et des missionnaires.



8. Réponse au problème de la troisième ville de Paul Erdős.

Élégamment
Le couteau le décapite
J'évide
la calotte
Douce
Frémissant gentiment

Qu'y a-t-il de plus important : la poule ou l'œuf? La poule n'est-elle, comme le dit Samuel Butler, qu'un moyen pour l'œuf de créer un autre œuf? Ou est-ce l'inverse?

Le narrateur de S. Anderson conclut ainsi son récit de l'échec humain : « Je me levai à l'aube et contemplai un long moment l'œuf posé sur la table. Je m'émerveillai sur l'origine de l'œuf : pourquoi l'œuf produit la poule qui elle-même produit l'œuf? La question s'est inscrite dans mon sang. Elle y est restée, j'imagine, car je suis le fils de mon père. En tout cas le problème reste sans solution dans mon esprit. Et j'en conclus que tout ceci n'est qu'une preuve du triomphe complet et final de l'œuf — au moins en ce qui concerne ma famille. »

Voici les réponses aux problèmes de graphes du mois dernier : l'unique circuit hamiltonien est obtenu en partant de R et en suivant le chemin orienté qui épelle les mots RUE D'HAMILTON. La dernière étape joint N à R .

La figure 7 est un graphe représentant l'une des multiples solutions en sept traversées du problème des six missionnaires et des six cannibales qui veulent traverser sains et saufs une rivière (avec un bateau pouvant contenir cinq personnes).

Pour résoudre le problème d'Erdős, il faut placer les flèches sur le graphe complet comme il est indiqué sur la figure 8. Bien entendu, tous les sommets, ainsi que les axes reliant ceux-ci, peuvent être permutés de n'importe quelle façon pour engendrer des solutions qui n'apparaissent pas dans cette disposition symétrique; toutes ces solutions sont topologiquement équivalentes. Référence : *On a General Problem in Graph Theory* par Paul Erdős dans *The Mathematical Gazette* (Vol. 47, n° 361, pp. 220-223, octobre 1963).

Benjamin Schwartz me fait remarquer que la démonstration d'impossibilité du casse-tête du saut de pion de la rubrique de mars est encore valable lorsque les sauts autorisés sont généralisés à des sauts en diagonales ou même à des déplacements de n'importe quelle longueur comme ceux du fou aux échecs. Dans ma rubrique de novembre, j'affirmais par erreur qu'une suite de sept 3 consécutifs dans le développement décimal de π commençait avec le 710 150^e chiffre. Robert Baillie fut le premier à m'envoyer le chiffre correct : 710 100, qui fut confirmé plus tard par Harry Nelson. ■

une nouvelle publication

gauthier-villars

avec le concours de

Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)
Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)
Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM)

Acta OEcologica

est une revue à vocation internationale consacrée à l'écologie fondamentale et à ses applications. Les articles traitent des aspects fondamentaux, de la structure, du fonctionnement et de la transformation des peuplements et des écosystèmes, de la dynamique des populations et de l'écophysiologie ainsi que des applications de ces études. Ils peuvent toucher à des questions d'aménagement et à des problèmes d'intérêt économique. Les milieux concernés sont essentiellement les milieux continentaux, qu'ils soient terrestres, dulçaquicoles

ou même littoraux. Ils peuvent être des milieux naturels ou des milieux transformés par l'homme, systèmes forestiers ou agronomiques. Les populations étudiées peuvent être végétales, animales et microbiennes.

Par un choix équilibré entre les articles, ACTA OECOLOGICA offre un panorama des recherches qui constituent les axes principaux de l'écologie moderne. Aux travaux originaux sont jointes des mises au point sur des problèmes essentiels et des articles de réflexion sur les tendances de l'écologie.

Trois séries :

OECOLOGIA GENERALIS - OECOLOGIA APPLICATA - OECOLOGIA PLANTARUM

Comité Scientifique

R. BOUCHET - INRA PARIS (France)
F. BOURLIERE - Université PARIS (France)
L. BRADER - FAO ROME (Italie)
F. di CASTRI - UNESCO PARIS (France)
P. DUVIGNEAUD - Université BRUXELLES (Belgique)
H. ELLENBERG - Université GOTTINGEN (Allemagne Fédérale)
F.B. GOLLEY - Université ATHENS (Etats-Unis)
D.W. GOODALL - CSIRO WEMBLEY (Australie)
J. HAMON - O.M.S. GENEVE (Suisse)
P. LEMEE - Université ORSAY (France)
A. MACFADYEN - Université BELFAST (Irlande)
R. MARGALEF - IIP BARCELONE (Espagne)

Rédaction

Directeur Général : M. LAMOTTE, Directeur du Laboratoire de Zoologie, Ecole Normale Supérieure, 46 rue d'Ulm, 75230 Paris Cedex 05.
Rédacteur en chef : Mme G. RICOU, Directeur du Laboratoire de Zoologie, INRA, 16 rue Dufay, 76100 Rouen.
Secrétariat de rédaction : Mme C. DOUCET, Laboratoire de Zoologie, Ecole Normale Supérieure, 46 rue d'Ulm, 75230 Paris Cedex 05.
"OECOLOGIA GENERALIS" : Y. GILLON, Directeur du Laboratoire d'Entomologie, Université de Paris-Sud, Centre d'Orsay, Bâtiment 446, 91405 Orsay Cedex.
"OECOLOGIA APPLICATA" : B. HURPIN, Chef du Département de Zoologie, INRA, La Minière, 78280 Guyancourt.
"OECOLOGIA PLANTARUM" : P. LOSSAINT, Directeur de Recherche CNRS, B.P. 5051, 34033 Montpellier Cedex.

Comité de Rédaction

OECOLOGIA GENERALIS

H. DECAMPS - Université TOULOUSE (France)
M. GODRON - CNRS MONTPELLIER (France)
C.M. HLADIK - Museum Brunoy (France)
P. JOURDHEUIL - INRA ANTIBES (France)
P. LEBRUN - Université LOUVAIN (Belgique)
Z. MASSOUD - CNRS BRUNOY (France)
R. OLDEMAN - WAGENINGEN (Pays-Bas)
F. RAMADE - Université ORSAY (France)
F. VUILLEUMIER - NEW YORK (Etats-Unis)

OECOLOGIA APPLICATA

M. ARROYO - INIA MADRID (Espagne)
V. DELUCCHI - EPF ZURICH (Suisse)
Y. DOMMERGUES - ORSTOM DAKAR (Sénégal)
D. DUVIARD - ORSTOM PAIMPONT (France)
V. LABEYRIE - Université TOURS (France)
J. LECOMTE - INRA JOUY (France)
J.C. LEFEUVRE - Museum BRUNOY (France)
J.C. ONILLON - INRA ANTIBES (France)
Y. ROBERT - INRA RENNES (France)

OECOLOGIA PLANTARUM

P. BOUVAREL - INRA NANCY (France)
M. GOUNOT - Université STRASBOURG (France)
M. HALLAIRE - INRA VERSAILLES (France)
W. LARCHER - Université INNSBRUCK (Autriche)
E. MEDINA - CARACAS (Vénézuëla)
H. MOONEY - STANFORD (Etats-Unis)
M. ROBELIN - INRA CLERMONT-FERRAND (France)
B. SAUGIER - Université ORSAY (France)
J.W. WOLDENDORP - ARNHEM (Pays-Bas)

BON DE COMMANDE à adresser à : C.D.R. Centrale des Revues, B.P. N° 119, 93104 MONTREUIL Cedex - France

Je désire m'abonner à :

☐ "OECOLOGIA GENERALIS"
4 numéros FF 230. Etranger FF 280.

☐ "OECOLOGIA APPLICATA"
4 numéros FF 230. Etranger FF 280.

☐ Je joins le montant, soit FF

☐ Je désire recevoir un spécimen

Nom

Etablissement

Adresse

Ville Code postal

Pays Date Signature

EXPÉRIENCES D'AMATEUR

A la recherche des Trilobites et des Crinoïdes fossiles.

par Jearl Walker

Durant de longs mois j'ai ramassé des fossiles dans l'Ohio, fouillant aussi bien les schistes que les calcaires. L'Ohio renferme une grande variété de fossiles parfaitement préservés. Je me suis surtout intéressé aux fossiles marins, en particulier aux Trilobites et aux Crinoïdes. J'évoquerai aussi les quelques fossiles de plantes que j'ai découverts dans cette région. J'insisterai sur les quatre points essentiels de la chasse aux fossiles : la découverte d'un bon gisement, le dégagement des fossiles, leur nettoyage et la présentation.

De nombreux paléontologistes amateurs recherchent particulièrement les fossiles de Trilobites et de Crinoïdes. Le Trilobite était un Arthropode, remarquable par la division de son corps en trois lobes (un au milieu et deux de chaque côté). Son corps était en outre composé de trois segments distincts : la tête, le thorax et l'abdomen. Les Trilobites étaient probablement des animaux nécrophages qui rampaient sur le fond de l'océan

en se nourrissant de débris organiques. Ils possédaient des pattes articulées mais il est rare de retrouver celles-ci dans les fossiles; l'exosquelette, plus dur, est en revanche bien conservé.

Les Crinoïdes sont un ancien groupe d'Echinodermes. Certains flottaient librement, mais la plupart étaient fixés sur le fond au moyen d'une tige terminée par des pédoncules évoquant des racines. Ces Crinoïdes ressemblaient davantage à des plantes qu'à des animaux; on les surnomme d'ailleurs lys de mer. Les Crinoïdes constituaient souvent de véritables prairies au fond des mers. Leur corps avait l'aspect d'une coupe surmontée d'une bouche entourée de cinq bras flexibles et ramifiés. Les parties les mieux conservées dans les fossiles sont la coupe buccale, la tige et les bras; en revanche, il est difficile de découvrir un Crinoïde entier et surtout de le retirer sans dommage de sa gangue rocheuse. Le paléontologiste ne rencontre habituellement

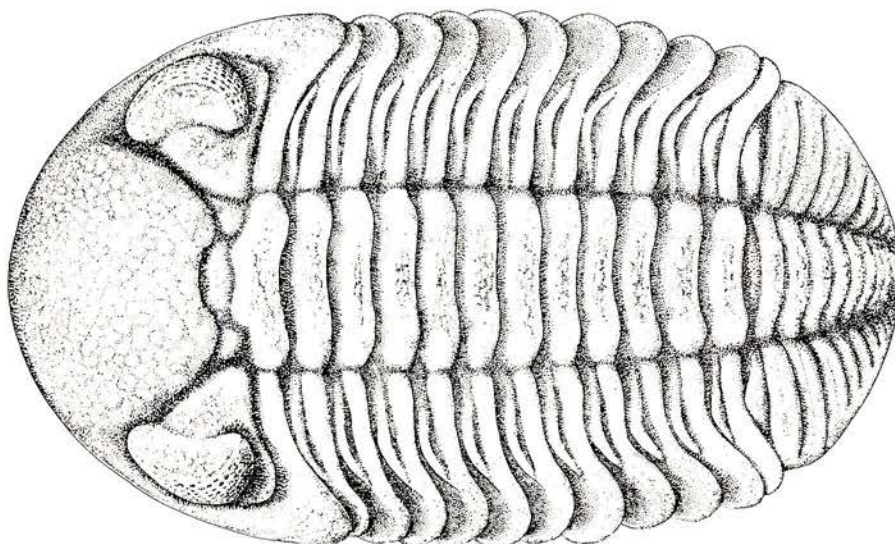
que des fragments de Crinoïdes; ils nous apprennent toutefois beaucoup sur la structure de ces animaux.

La meilleure façon pour trouver un bon gisement fossilifère consiste à profiter des compétences d'un chercheur professionnel. Si vous n'avez pas cette chance, vous devrez vous transformer en détective. La plupart des sites fossilifères sont situés dans des propriétés privées, n'oubliez donc pas de demander l'autorisation avant de pénétrer. Cette règle est très importante si vous désirez entrer dans des carrières ou des mines abandonnées; en effet, les anciennes exploitations peuvent se révéler particulièrement dangereuses.

Les tranchées qui bordent les routes et les voies ferrées recèlent parfois des fossiles. En France, la construction de l'autoroute A6 puis celle du T.G.V. ont permis de découvrir d'extraordinaires gisements fossilifères dans le Morvan aux environs de Liernais. Les fossiles (pour l'essentiel des Belemnites — des Céphalopodes aujourd'hui disparus — des Crinoïdes et des Mollusques — Huîtres, Gryphées...) sont noyés dans des couches de calcaires et de marnes du Lias. Pour découvrir un gisement, il n'y a qu'une seule méthode : promenez-vous et ouvrez l'œil. Si l'érosion n'a dégagé aucun fossile, creusez dans chaque affleurement de roches sédimentaires. Si vous découvrez des morceaux de fossiles, poursuivez vos recherches mais avec d'extrêmes précautions car la terre et les roches peuvent s'effondrer si vous n'y prêtez pas garde. Quel que soit l'intérêt du gisement, ne vous glissez jamais sous des surplombs rocheux!

Le lit d'un cours d'eau est un autre endroit intéressant pour le paléontologiste amateur. En marchant le long d'une rivière, regardez bien s'il n'y a pas de fossiles dans les alluvions. De temps à autre, n'hésitez pas à casser un galet; si vous y découvrez un fossile, fouillez alors les berges de la rivière pour retrouver l'affleurement d'où provient ce caillou.

Contrairement aux apparences, cette recherche est parfois délicate. Il y a plusieurs mois, mon ami Edgar Roeser m'a emmené à la chasse aux Trilobites dans un cours d'eau des environs de Cincinnati. Bien que quelques fossiles soient visibles sur les rives et au fond de la rivière, la plus grande partie des roches découvertes aux basses eaux étaient désespérément stériles et ne renfermaient que quelques spécimens fort communs. Nous cherchions un type particulier de Trilobite, le *Flexicalymene*. Après avoir découvert quelques spécimens noyés dans une couche rocheuse, E. Roeser m'a montré comment cette couche fossilifère continuait en amont et disparaissait sous l'eau. Une rapide extrapolation géométrique et nous pénétrâmes dans l'eau à



1. Le Phacops rana milleri, un Trilobite du Dévonien moyen.

l'endroit où la couche affleurerait sous les alluvions. Nous avons alors patiemment dégagé la boue et les blocs de schistes qui encombraient le fond de la rivière. En quelques heures, nous avons récolté chacun cinq « Flexis » dont certains en très bon état.

Les carrières et les mines sont deux autres endroits privilégiés pour le paléontologiste amateur. Attention, ne pénétrez jamais dans une galerie de mine non exploitée! A proximité des mines on rencontre fréquemment des déblais abandonnés au moment de l'exploitation (les terils des mines de charbon sont un exemple parfait). Beaucoup préfèrent fouiller ces déblais car on évite ainsi le long et pénible travail de creusement. J'ai rencontré un jour un des adeptes de ce genre de fouilles. Personne n'avait un œil aussi expérimenté pour découvrir des Trilobites enroulés au milieu des déblais. Je le soupçonne d'ailleurs d'avoir pris un plaisir un peu sadique à montrer ses découvertes à mes amis qui venaient de passer une demi-journée dans la carrière sous un soleil brûlant... pour ne récolter que quelques fragments dépareillés de Trilobites!

Le plus beau Trilobite que j'ai découvert, je l'ai ramassé en moins d'une heure dans les déblais de la première carrière que j'ai visitée. Il a la forme d'un petit rouleau d'environ

deux centimètres de diamètre. Sur l'animal en parfait état de conservation, on distinguait nettement les facettes des yeux composés. Tous les autres Trilobites que j'ai récoltés dans cette carrière durent être arrachés aux murs de la carrière au prix d'énormes efforts.

Dès que vous avez découvert un gisement fossilifère, dressez une carte du site et indiquez sa position exacte sur une carte topographique de la région. D'autres personnes pourront ainsi retrouver le gisement. Si vous reportez sur une même carte les divers sites fossilifères visités, vous pourrez effectuer des corrélations entre les espèces et les faunes entre plusieurs endroits d'une même région. Grâce à une carte géologique, vous pourrez prédire la position d'autres gisements dans le secteur.

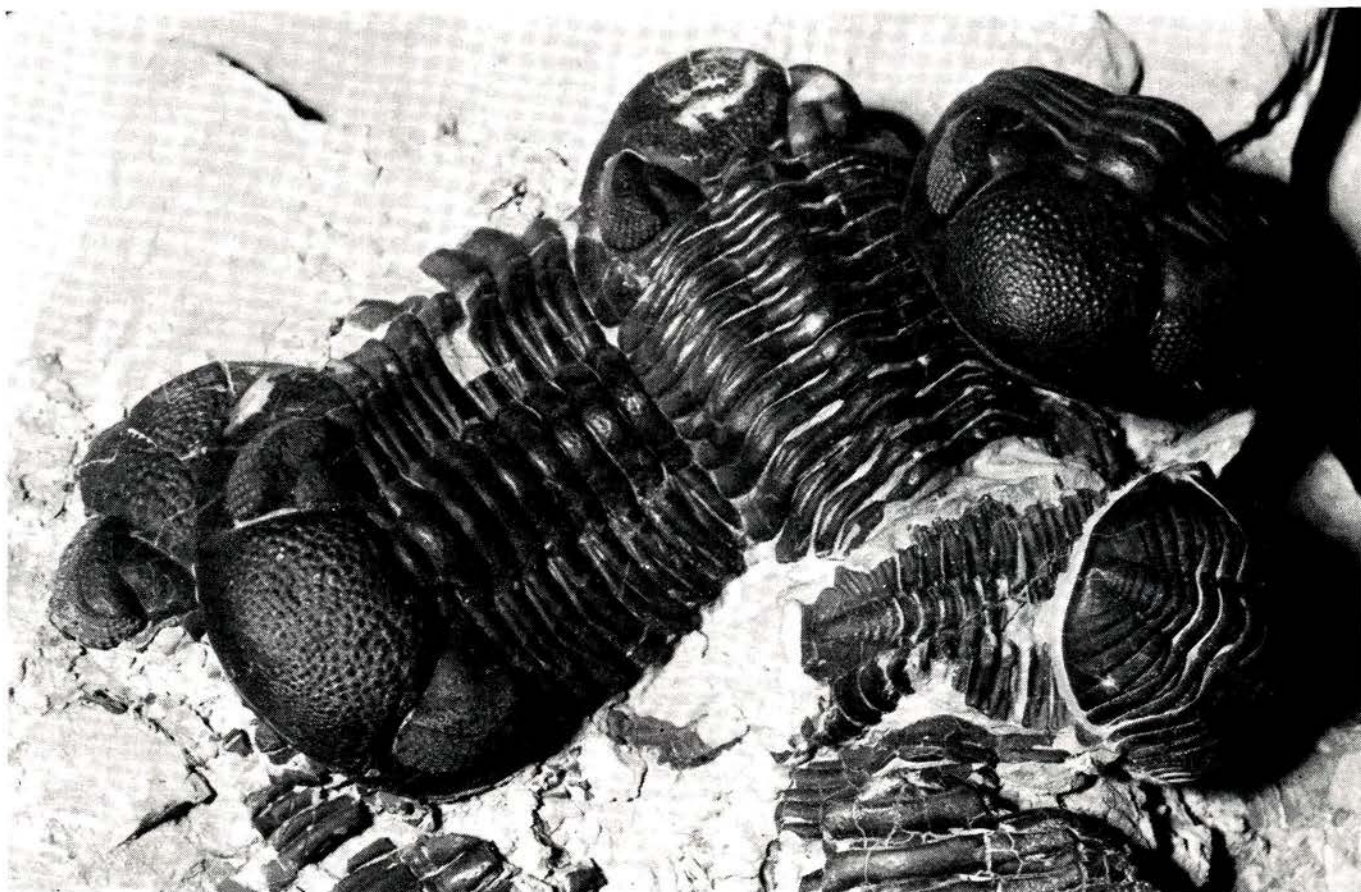
Afin de faciliter les identifications et les corrélations, étiquetez chaque fossile dès que vous l'avez ramassé. Écrivez le nom de l'endroit et la date de découverte sur la boîte où vous rangez le fossile. Vous devriez aussi indiquer le niveau stratigraphique dont il provient. Quand vous reviendrez ensuite à cet endroit, vous pourrez ainsi continuer vos recherches sans perdre de temps à fouiller des niveaux sans grand intérêt.

Certaines roches sédimentaires sont plus faciles à fouiller que d'autres. Les calcaires et les grès ren-

ferment parfois de magnifiques spécimens mais qui sont difficiles à extraire de leur gangue. Les schistes, les argiles, les marnes et les sables sont beaucoup plus faciles à creuser. Vos recherches avanceront plus vite et vous pourrez ainsi trier un volume de roche bien plus important. En outre, les spécimens sont plus aisés à extraire et risquent moins de se briser sous les coups de burin.

Si la couche fossilifère affleure sur le bord d'une tranchée, vous devez être capable de la retrouver de l'autre côté de la tranchée. Si la couche est horizontale, vous découvrirez peut-être des fossiles tout le long de cette tranchée. Si la couche est fortement plissée ou fracturée, il sera plus difficile de la suivre; en outre les fossiles risquent d'avoir été détruits ou tordus sous l'effet des déformations.

J'ai ramassé la plupart de mes fossiles dans les berges de certains cours d'eau ou dans des carrières. Cette chasse au trésor présente quelques risques. Ainsi les tirs de mine créent souvent des pyramides rocheuses qui ne demandent qu'à s'effondrer, même quand elles paraissent solides. Plusieurs paléontologistes amateurs ont déjà été victimes d'accidents graves pour n'avoir pas respecté ces consignes élémentaires de sécurité ou pour s'être approchés trop près du front de taille d'une



2. Un groupe de Trilobites fossiles.

carrière. Même si vous êtes un amateur chevronné, ne cédez jamais au sentiment de confiance que donne l'habitude.

Pour fouiller la pente d'un talus, on commence par niveler une surface qui servira de « table de travail ». On dégage ensuite la couche fossilifère en ayant soin de faire une saignée verticale dans la roche. Si des blocs paraissent mal assurés, n'hésitez pas à les abattre. Ce travail de déblaiement dure parfois des heures et demande d'énormes efforts. Les déblais renferment parfois d'intéressants fossiles, mais cette phase du travail apporte plus de fatigue que de satisfaction.

Quand tout est dégagé, la chasse peut alors commencer. Les Trilobites qui m'intéressaient étaient souvent dissimulés dans des schistes (une roche proche de l'ardoise et ressemblant à un gigantesque mille-feuilles). Les schistes se débitent sous forme de dalles de quelques millimètres ou de quelques centimètres d'épaisseur. Pour dégager ces plaques de schiste, on plante des burins dans les plans de clivage de la roche. Après avoir enfoncé ces burins de quatre ou cinq centimètres, on les utilise comme des leviers pour faire éclater la roche. On sépare ainsi des tranches de schistes que l'on extrait ensuite de l'affleurement en découpant les côtés au moyen d'un long burin très aiguilé.

Dès que la plaque est extraite, on examine attentivement les deux

faces. Si l'on n'aperçoit aucun fossile, on pose la plaque de chant et on la clive avec un petit burin ou un tournevis que l'on enfonce dans la tranche du bloc de schiste. Bien que ces roches se clivent aisément, il faut néanmoins opérer avec précaution; j'ai détruit quelques beaux spécimens de Trilobites en ayant, au début, la main un peu lourde.

Ce travail de recherche peut durer des heures, voire des jours. Certains préfèrent abattre des pans de la paroi et chercher ensuite dans les déblais. Cette méthode barbare, outre qu'elle détruit en peu de temps les affleurements, livre le plus souvent des fossiles abîmés ou brisés. La première méthode est certes plus longue et plus méticuleuse; elle permet toutefois de récupérer de délicats spécimens de Trilobites ou de Crinoïdes en parfait état. Si par hasard vous découvrez plusieurs beaux fossiles sur une même plaque de schistes, l'objet sera bien plus beau à contempler que divers fossiles épars dégagés de leur gangue.

Scott Vergiels de Temperance dans le Michigan, m'a montré récemment une plaque de schistes qu'il avait sortie d'une carrière près de Toledo. Elle contenait une Crinoïde entière et sept Trilobites. Je fus fort impressionné. S. Vergiels m'a aussi parlé d'une seconde plaque que Jeff Aubry, un autre paléontologiste amateur de grand renom, avait extraite de la même carrière: elle contenait 26 Trilobites complets.

Mis à part des spécimens peu fragiles (comme certains Brachiopodes), il vaut mieux laisser les fossiles dans leur gangue tant qu'on ne les a pas ramenés chez soi. Évitez de nettoyer un fossile sur le terrain. Si des éclats se détachent du fossile quand vous le dégagez, ramassez-les soigneusement. Je préfère ensuite les recoller sur la matrice de façon à reconstituer le fossile une fois rentré chez moi. Une colle blanche (soluble dans l'eau et pouvant donc s'éliminer facilement) fera très bien l'affaire. Si le fossile menace de se briser, appliquez une petite quantité de colle le long de la fissure. Par capillarité, la colle pénétrera entre les morceaux et les consolidera en quelques minutes.

Beaucoup d'amateurs préfèrent ranger toutes leurs découvertes (à l'exception des plus grandes plaques) dans des boîtes de différentes tailles. Évitez alors d'empiler les fossiles les uns sur les autres, ils pourraient s'endommager mutuellement. Si vous enveloppez vos spécimens dans du papier journal, du papier hygiénique ou de la mousse plastique, vous pouvez les transporter sans risque dans un sac à dos.

On peut nettoyer grossièrement de nombreux fossiles avec une vieille fraise de dentiste ou même une simple épingle de sûreté. Pour dégager les Trilobites, on gratte le schiste en veillant à n'enlever aucune partie du fossile: il faut des pointes de métal très acérées pour enlever le schiste incrusté dans les fines cannelures du



3. Un magnifique Crinoïde.

corps des Trilobites et dans les bras des Crinoïdes.

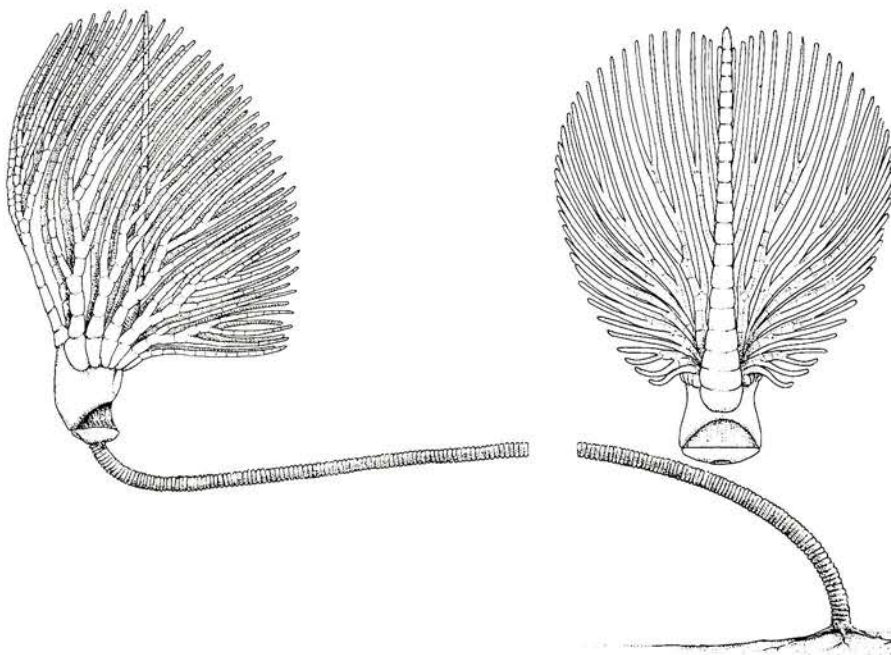
On peut réaliser un excellent nettoyage en utilisant de petites fraises montées sur une perceuse miniature, équipée ou non d'un flexible prolongateur. Ces perceuses coûtent entre 100 et 500 francs et sont vendues dans tous les magasins de modélisme. Une petite pointe d'acier est aussi un instrument fort utile surtout pour reconstituer des fossiles brisés. Après avoir placé une goutte de colle à l'endroit de la cassure, on humecte le bout de la pointe et on s'en sert pour saisir le fragment et le replacer au bon endroit sur le fossile.

Certains produits chimiques enlèvent sélectivement le schiste ou le calcaire grâce à une réaction qui préserve le fossile. Par exemple, certains acides dissolvent le calcaire sans entamer un fossile siliceux. Avec les spécimens enrobés dans les schistes, je préfère éviter les produits chimiques car j'obtiens de meilleurs résultats avec une petite fraise. En revanche, quand le fossile est noyé dans du calcaire, j'ai souvent recours aux produits chimiques (l'acide chlorhydrique en particulier).

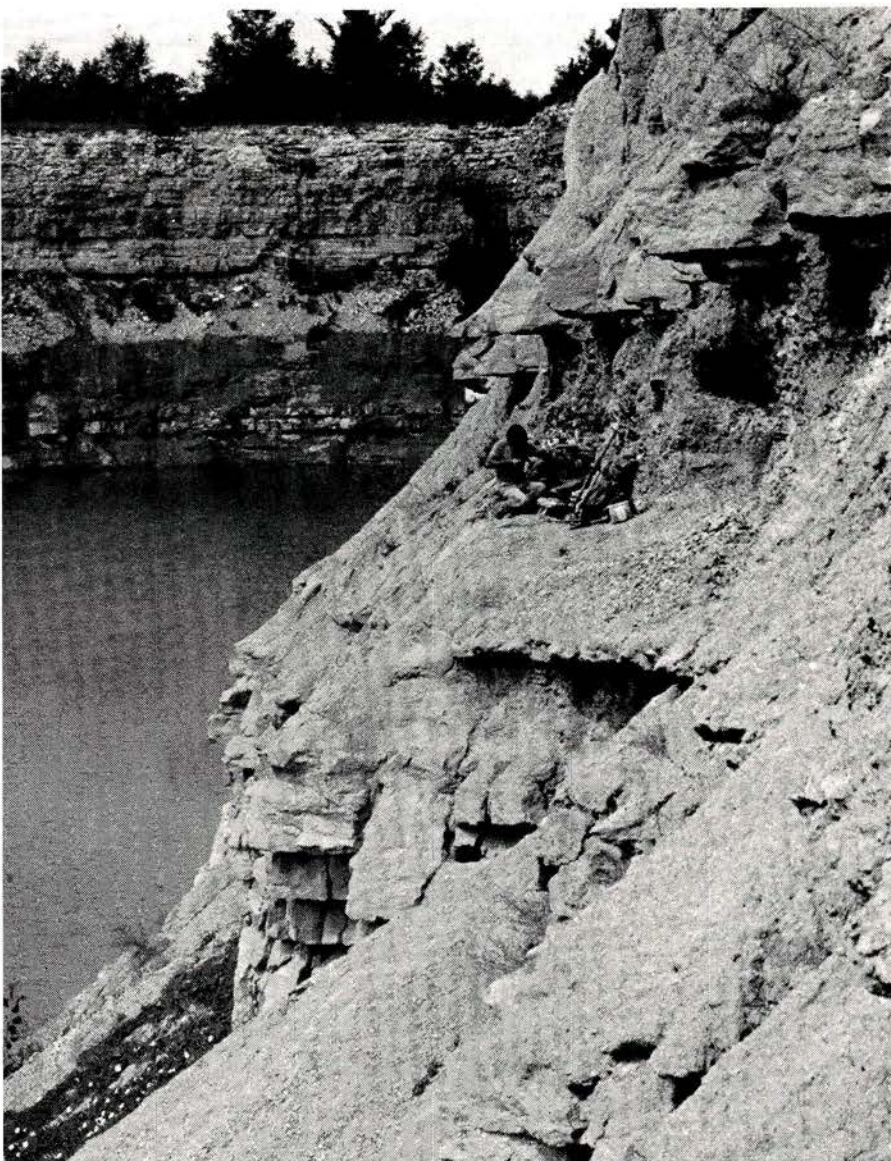
Si le bloc contenant le fossile est trop gros, on peut le scier aux bonnes dimensions et polir l'une des faces avec un disque abrasif spécial. Les outils nécessaires (analogues à ceux utilisés par les maçons pour couper les briques) se trouvent dans tous les magasins de bricolage. Ils se montent sur n'importe quelle perceuse ordinaire. En polissant le dos de l'échantillon, vous pourrez réaliser des tableaux surprenants. E. Roeser a présenté certains de ses fossiles sur une toile tendue sur un cadre de bois. Vous pouvez aussi conserver vos fossiles dans des boîtes spéciales en plastique transparent (comme celles employées par les bricoleurs pour ranger clous, vis et boulons).

Ma plus belle découverte paléontologiste provient d'une carrière des environs de Toledo dans une couche datant du Dévonien (il y a 350 millions d'années). Les roches qui affleurent dans cette carrière renferment de nombreux fossiles de Brachiopodes, de Coraux ainsi que quelques Bryozoaires, des Crinoïdes et des Blastoïdes. La plupart de ces roches sont de nature siliceuse. On rencontre aussi, dans certaines zones de la carrière, d'anciens bancs de vase transformés en schistes et en calschistes. Ces niveaux plus argileux renferment des Bryozoaires, des Brachiopodes, des Ostracodes, des Trilobites, des Coraux et d'autres animaux marins.

Une ancienne mer occupait autrefois l'emplacement de la carrière. Sa profondeur ne devait pas dépasser une cinquantaine de mètres sinon les coraux n'auraient pas pu survivre (manque de lumière). En revanche, cette mer ne devait guère être moins profonde puisque l'on ne retrouve



4. Le Crinoïde *Cunctocrinus fortunatus* vu de côté (à gauche) et de dos (à droite).



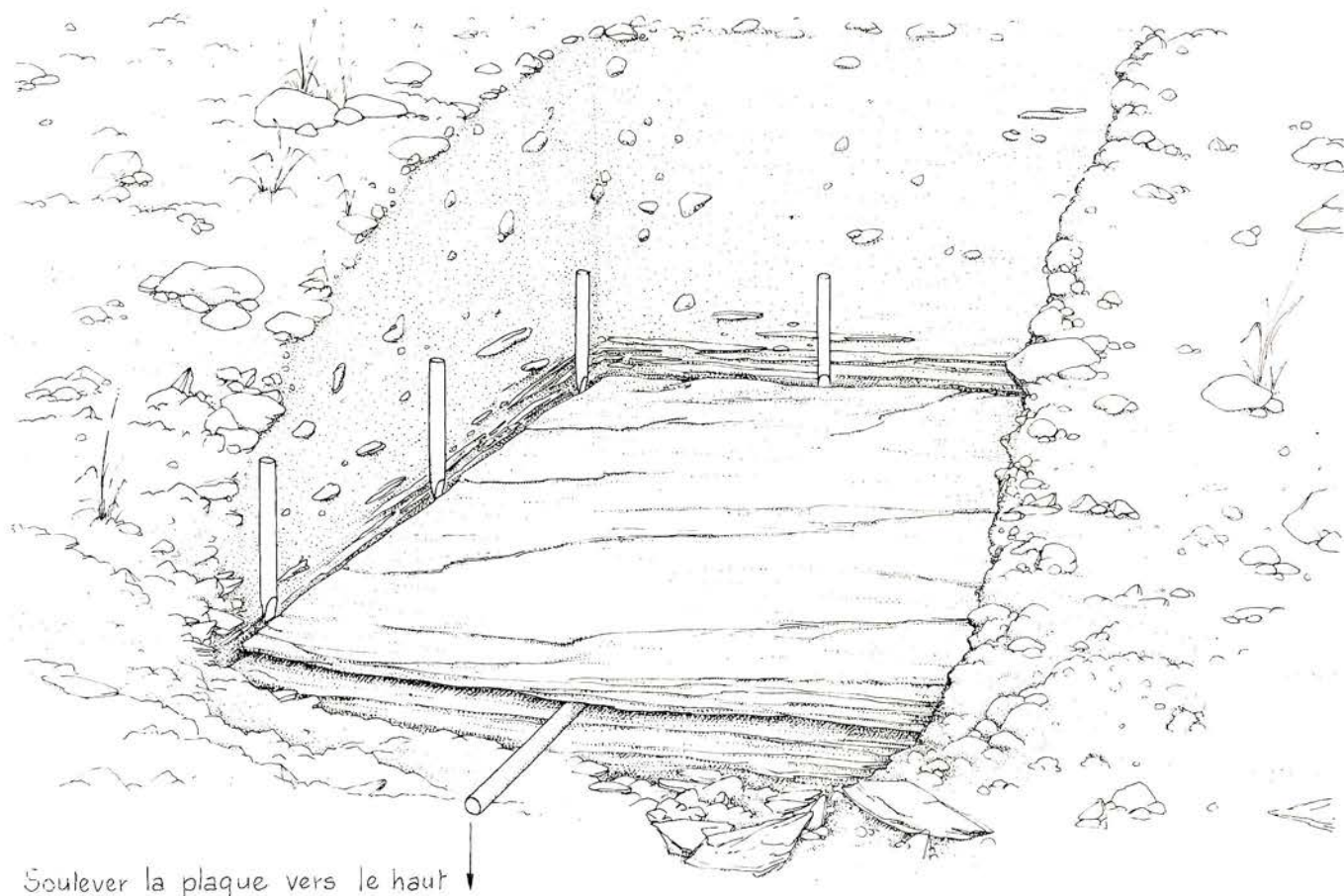
5. Un chasseur de fossile en pleine activité.

aucun signe de turbulence caractéristique des eaux littorales (coquillages cassés et roulés). En outre, l'existence d'une faible tranche d'eau, brassée mécaniquement par les vagues et les courants, n'aurait pas permis la formation des prairies de Crinoïdes et la vie d'autres animaux aux squelettes fragiles. Les couches rocheuses qui affleurent dans cette carrière ont été corrélées avec la série géologique du bassin du Michigan. Dans les roches siliceuses, deux types de trilobites prédominaient : les *Phacops rana crassituberculata* et les *P. rana milleri*. Les *P. crassituberculata* se retrouvent en abondance

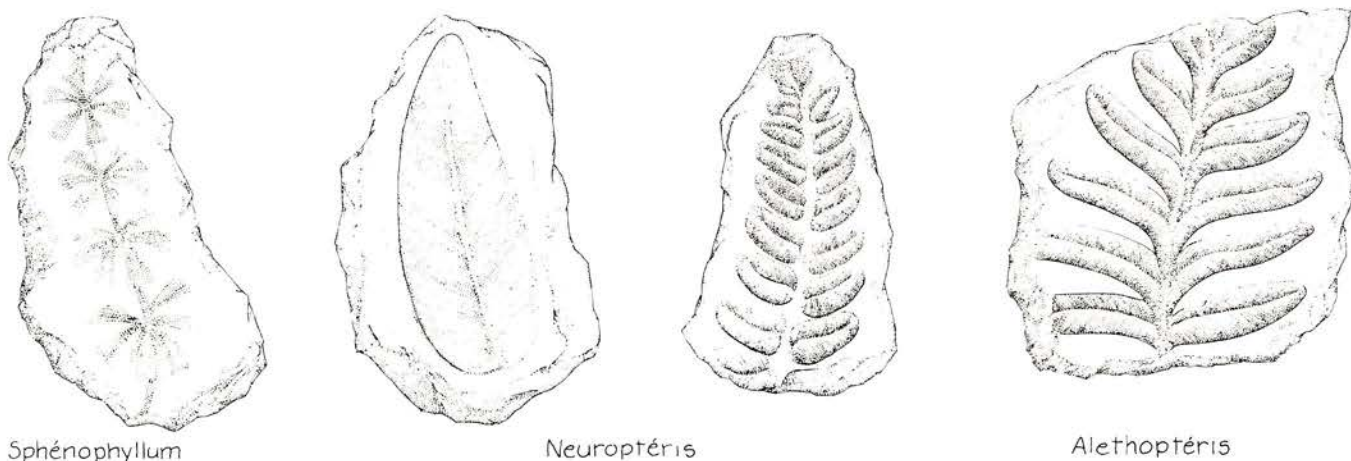
dans des niveaux inférieurs aux couches à *P. rana milleri* : ils auraient donc vécu à une période légèrement antérieure, bien que certaines plaques de schistes contiennent les deux sortes de trilobites.

Mes investigations paléontologiques se déroulaient souvent en deux phases : un, déblaiement, deux, extraction de grandes plaques de schistes. Tôt le matin je creusais dans la paroi afin de dégager la couche fossilifère sur une largeur de un mètre environ. J'approfondissais ensuite l'entaille jusqu'au soubassement calcaire. Près de la surface, les schistes étaient en grand partie désa-

grégés sous l'effet des intempéries (pluies, gel, neige). Ils étaient parfois si fragiles qu'ils se brisaient dans la main. Les seuls fossiles que j'ai récupérés dans ces schistes « pourris » étaient des Brachiopodes. Je continuais mon lent travail de déblaiement jusqu'au milieu de l'après-midi afin d'atteindre des schistes moins altérés et qui pouvaient se débiter en grandes plaques. Je creusais alors avec plus de précautions afin de ne pas endommager les fossiles. Certains de mes amis, plus costauds, extrayaient parfois des plaques pesant plus de 50 kilogrammes. Bien que ces plaques soient difficiles à



6. Comment extraire une plaque de schiste.



7. Quelques fougères à graines fossiles.

manier, elles font bien souvent gagner un temps précieux au chercheur de fossiles. Plus vous extrayez de roches, plus vous avez de chance de trouver des spécimens rares. L'activité de certains de mes amis était comparable à celle de véritables pelles mécaniques!

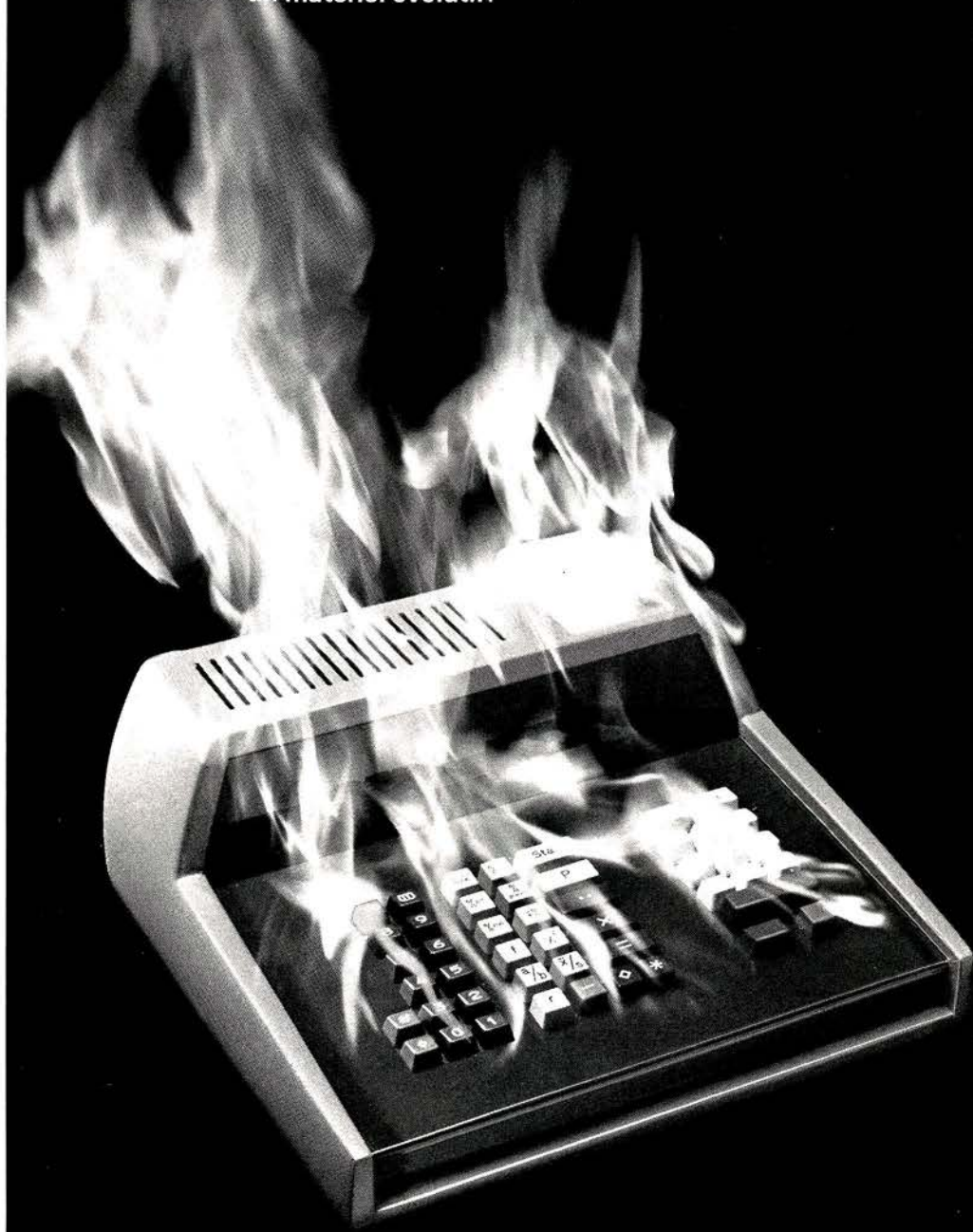
Quand je rencontrais un fossile intéressant, ma vitesse de fouille diminuait considérablement et je redoublais de prudence. D'habitude, un trilobite enroulé est assez solide pour qu'on puisse l'extraire de sa matrice sans risquer de l'abîmer. Les Trilobites déroulés et les Crinoïdes requièrent plus de soin. Il faut souvent appliquer un peu de colle blanche diluée sur le Trilobite avant de le sortir de la plaque de schiste. Il est en revanche très difficile de recueillir intacts les fragiles Crinoïdes, sauf si l'on a la chance extraordinaire de cliver la plaque de schiste juste au bon endroit. Si l'on n'a pas cette chance, il faut travailler patiemment avec de petits burins et en donnant de petits coups de marteau pour dégager le Crinoïde sur toute sa longueur. Rien n'est plus désespérant que de voir une petite fracture traverser un beau spécimen de Crinoïde ou de Trilobite.

Durant leur vie, les Trilobites muiaient périodiquement. Ils perdaient l'ancien exosquelette devenu trop petit et en fabriquaient un autre, plus grand. Les traces de mues sont relativement abondantes dans certains schistes. J'ai ramassé un Trilobite qui était mort juste après avoir mué. Il n'avait pas encore eu le temps de fabriquer un autre exosquelette. Ces spécimens sont peu fréquents car ils sont très fragiles; en outre, leur couleur est la même que celle du schiste, si bien qu'ils passent souvent inaperçus. Les fossiles de Trilobites ayant conservé les appendices mous qui encadraient leur corps sont extrêmement rares. On en trouve quelquefois dans certaines roches siliceuses, comme les jaspes ou les cherts. L'exosquelette est alors transformé en carbonates et en phosphates de calcium; ces produits ont remplacé la substance chitineuse originale.

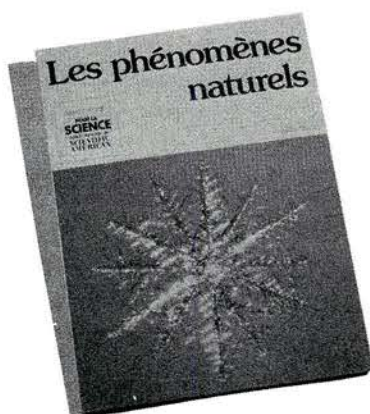
De tous les fossiles que j'ai récoltés, les Trilobites me semblent les plus fascinants. L'évolution leur a donné des formes d'une étrange beauté. Les spécialistes ont identifié de nombreuses espèces de Trilobites tout autour du globe. Ces animaux présentaient une grande diversité de taille et de forme. Les adultes mesuraient, selon les espèces, entre six millimètres et 75 centimètres. Les premiers Trilobites sont apparus au Cambrien (il y a quelque 600 millions d'années). Leur apogée se situe au milieu de l'ère primaire (Silurien, Dévonien). Leur déclin fut ensuite assez rapide; les derniers Trilobites ont disparu au Permien (il y a

Que faire lorsqu'on a dépassé les limites du calculateur programmable?

Où trouver d'autres possibilités graphiques, davantage de mémoire, plus de souplesse et un matériel évolutif?



Comprendre le présent, choisir le futur.



LES PHÉNOMÈNES NATURELS

Ils sont quotidiens, aussi prend-on l'habitude de les vivre sans vraiment les comprendre. Cet ouvrage explique, par exemple, l'arc-en-ciel, le tonnerre, les méandres des rivières, la neige, le sel de la mer, la théorie des odeurs, à la lumière des plus récentes découvertes. (Préface de Louis NEEL, de l'Académie des Sciences, Prix Nobel).

BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Commencez sans délai
une collection qui fera date.

Bon de commande :
encart page 89

225 millions d'années). Ils vivaient de préférence dans des eaux peu profondes où il se nourrissaient de petits organismes et de débris organiques.

Les adaptations des Trilobites traduisent une grande variété des modalités évolutives. Par exemple, les yeux des diverses espèces de Trilobites diffèrent notablement. Certains ont de petits yeux en forme de croissants, d'autres de grands yeux ronds. Quelques espèces possèdent des yeux pédonculés alors que d'autres sont totalement aveugles. Ces différences de morphologie peuvent s'interpréter de plusieurs façons. Les gros yeux globuleux étaient nécessaires aux Trilobites vivant en eaux profondes où la luminosité était faible. Quant aux Trilobites aveugles, de nombreux spécialistes supposent qu'ils vivaient entièrement enfouis dans la vase.

Les Trilobites que j'ai récoltés dans la carrière de Toledo avaient des yeux composites dont les facettes étaient arrangées de deux manières différentes. Les yeux des *Phacops rana milleri* comprennent en moyenne 104 facettes disposées en plusieurs rangées verticales de huit facettes chacune. Les yeux de *Phacops rana crassituberculata* n'ont que 77 facettes rangées en colonnes de six ou sept facettes. Dans certains fossiles de Trilobites, chaque facette de l'œil composite est constituée de deux couches de matériaux disposées de sorte que les surfaces extérieures et intérieures aient un contour convexe simple et la surface entre les couches, une forme plus complexe. Selon Euan Clarkson, paléontologiste à l'Université d'Edimbourg et Ricardo Levi-Setti, physicien à l'Université de Chicago, la forme de cette lentille composite permettrait d'éliminer presque complètement l'aberration sphérique.

La couche externe de l'œil du Trilobite est formée de calcite (un minéral biréfringent analogue à celui que j'évoquais dans cette rubrique en février 1978). Quand la lumière traverse un minéral biréfringent, elle est séparée en deux composantes dont les directions de polarisation sont imposées par les propriétés cristallographiques du minéral. Si les yeux à facettes des Trilobites avaient décomposé la lumière, l'animal aurait été incapable d'interpréter les informations visuelles transmises par l'environnement. L'évolution a judicieusement privilégié un type de lentille oculaire dans laquelle l'orientation de la lame de calcite évitait l'apparition d'une double image. L'axe optique de la lame de calcite était parallèle au trajet optique des rayons lumineux dans la lentille. La lumière incidente n'était donc pas affectée par la biréfringence du cristal et le Trilobite ne voyait qu'une seule image.

Outre les Trilobites, j'ai récolté l'été dernier de nombreux fossiles de plantes près d'anciennes mines de

charbon. D'importantes quantités de schistes avaient été abandonnées dans des déblais, près du carreau de la mine. Malheureusement, je n'y ai trouvé aucun fossile. Non loin de là, un petit ruisseau avait creusé son lit dans une autre couche de schistes. Ces derniers étaient, par endroits, bourrés de plantes fossiles.

E. Roeser m'a aidé à débayer les roches qui recouvraient les rives du cours d'eau près des endroits intéressants. Nous avons réussi de la sorte à dégager la couche fossilifère. Malgré l'abondance des restes végétaux, il a été très difficile d'obtenir un spécimen entier, en raison notamment de l'orientation des fossiles par rapport aux lames de schistes. Un grand nombre de plantes n'étaient pas coincées entre les strates mais disposées tout à fait au hasard. Quand je clivais une plaque de schiste, la cassure passait presque inévitablement à travers plusieurs spécimens.

La plupart des fossiles de plantes que nous avons découverts dans ce site, sont des fougères à graines. Ces végétaux ont l'aspect des vraies fougères mais ils portent des graines et non des spores comme les fougères actuelles. Nous avons découvert plusieurs types différents de fougères à graines. Le *Sphenophyllum* est une élégante fougère ayant des couronnes de feuilles en formes d'éventails, fixées à l'extrémité de tiges élancées. L'*Alethopteris* a de longues folioles qui se développent à partir d'un réseau de nervures centrales. Nous avons aussi trouvé des fragments de *Pecopteris* et de *Neuropteris*.

Toutes ces plantes se sont déposées dans de la vase au fond d'une lagune stagnante, il y a environ 230 millions d'années. Contrairement aux Trilobites ou aux Crinoïdes, ces plantes ne renfermaient aucune pièce squelettique minérale. Leur préservation dépendait exclusivement des conditions chimiques régnant dans la vase, en particulier l'absence d'oxygène et de bactéries aérobies.

Il existe, en France, des milliers de gisements de fossiles. Les animaux conservés sont d'une extraordinaire diversité. Des grands Cérithes du bassin de Paris aux Trilobites de Bretagne, en passant par les Graptolites des Ardennes et les récifs coralliens de l'Yonne, le paléontologiste amateur a de quoi satisfaire sa curiosité. Les personnes désirant s'initier à ce type de chasse un peu particulier, ont intérêt à se plonger dans la lecture des guides géologiques régionaux parus aux Éditions Masson. Au nombre d'une vingtaine, ils passent en revue les principales caractéristiques géologiques, minéralogiques et paléontologiques des différentes régions françaises. Prenez garde toutefois, la passion des fossiles est une manie dévorante qui s'attrape très facilement!

La famille MINC-11 de Digital Equipment: toute la puissance informatique au service de la recherche, de l'acquisition et du traitement de données.

Un ordinateur de bureau vous coûterait environ 40.000 F. Pour un prix à peine plus élevé, vous pouvez bénéficier des performances informatiques de la gamme MINC.

Le cœur du MINC est un micro-ordinateur LSI-11 – 60.000 octets de mémoire et 512.000 caractères de stockage sur disque, au minimum.

MINC vous aide à chaque étape de votre travail, qu'il s'agisse de résolution d'équations simultanées, de stockage de données, de traçage de courbes, d'exécution de transformations de Fourier rapides, de calcul de taux de dépréciation, de prévision de variance ou de réalisation d'analyses de régression.

Les instructions du langage BASIC-MINC sont concises et faciles à apprendre grâce à des manuels d'utilisation très complets. Elles vous permettent de contrôler l'acquisition et le traitement de données, de manipuler des fichiers-disques, de piloter des tables traçantes, de lire des coordonnées, de visualiser des résultats sous forme d'histogrammes et de courbes sur un terminal graphique.

Sur des systèmes plus importants, BASIC-MINC vous permet d'échantillonner des tensions analogiques, de détecter des fermetures de contacts, de synchroniser des événements, de contrôler des appareils de mesure tels que des chromatographes en phase gazeuse, des synthétiseurs de

fréquence et toute une gamme d'appareils aux normes IEEE-488. Il vous est aussi possible de saisir des données à partir de 7 modules optionnels d'entrées/sorties.

A l'aide de ces modules interchangeables perfectionnés, vous pouvez échantillonner 64 sources de tension, générer des tensions de contrôle, connecter des dispositifs compatibles TTL, tester des changements d'état et commander des voyants et relais. La résolution des signaux s'exprime en microvolts. Un tel système vous fait bénéficier de 60 programmes d'application. Sur son chariot mobile, MINC trouve sa place dans un bureau, une salle de classe comme dans un laboratoire.



Vous pouvez utiliser le système d'exploitation temps réel RT-11 de Digital Equipment et communiquer avec des ordinateurs de grande puissance.

De nombreux programmes ont été écrits pour les 100.000 mini-ordinateurs PDP-11 installés dans le monde entier. En tant qu'utilisateur d'un MINC-11, vous y accédez par l'intermédiaire de DECUS, la plus importante association mondiale d'utilisateurs d'ordinateurs.

MINC-11 suit la croissance de votre application et vous apporte la vitesse, le stockage et le logiciel nécessaires à cette évolution.

Pour en savoir plus sur nos systèmes MINC, renvoyez-nous le coupon ci-dessous.

Je souhaite recevoir la documentation MINC-11.

Application concernée _____

Nom _____

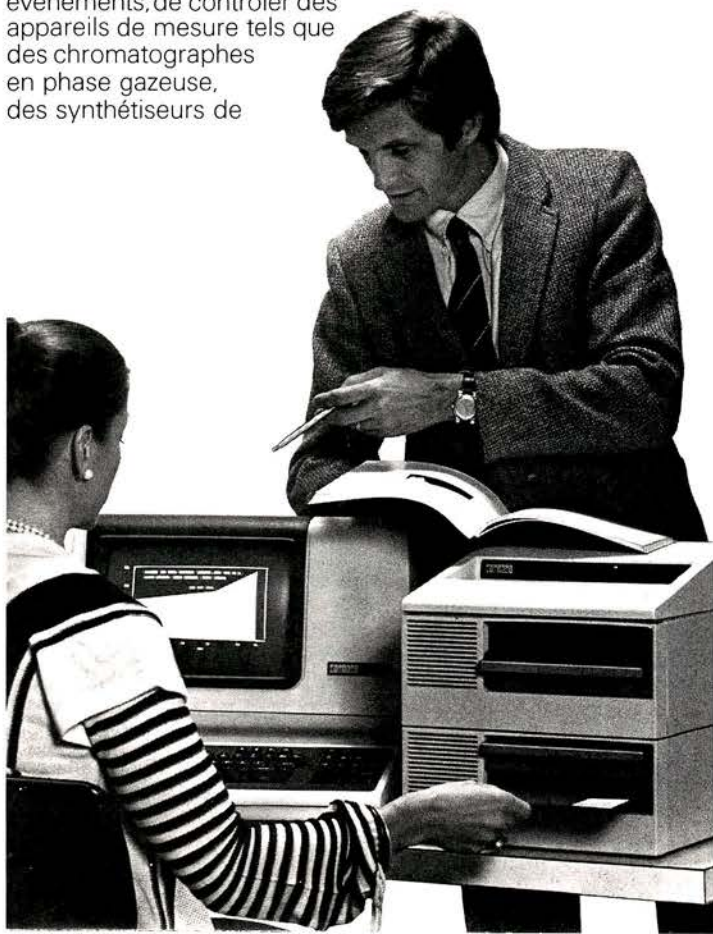
Fonction _____

Société _____

Adresse _____

Tél. _____

A retourner à: Digital Equipment France
Département Marketing
18, rue Saarinen Silic 225
94528 Rungis Cedex – Tél.: 687-23-33+



digital

LIVRES

Science et politique

Le complexe atomique. Histoire politique de l'énergie nucléaire. Bertrand Goldschmidt, Fayard, 1980.

Nul ne pouvait être mieux qualifié que Bertrand Goldschmidt pour retracer les différentes étapes de l'aventure atomique, surtout sous leur aspect politique. Ingénieur de formation, il n'a cessé depuis quarante ans d'y être mêlé : tout d'abord comme chimiste et atomiste confirmé, il prend part au Canada et aux U.S.A., au cours de la dernière guerre, à l'étude des propriétés du plutonium qui venait à peine d'être découvert. La paix revenue, dès la création du CEA (Commissariat à l'Énergie atomique), on lui confie la responsabilité de la chimie, puis celle des relations extérieures et enfin, à ce titre, il représente la France, comme gouverneur au Conseil de l'AIEA (Agence internationale de l'Énergie atomique), et participe aux négociations internationales sur les problèmes nucléaires. Il préside aujourd'hui ce Conseil, pour l'année 1980.

Cette aventure atomique, bien loin d'ailleurs d'être terminée, présente une grande complexité liée aux multiples problèmes qu'elle soulève, scientifiques, techniques, économiques, politiques et militaires, exacerbés par l'énormité des enjeux. C'est dire aussi qu'on ne saurait résumer un tel ouvrage de cinq cents pages extrêmement denses, dont chacune est riche de renseignements souvent peu connus. Un style clair et alerte, parfois plein d'humour en rend la lecture agréable. Nous nous limiterons donc à citer quelques sujets traités parmi les principaux.

Bien qu'assez imbriquées les unes dans les autres, les applications militaires et civiles du nucléaire font l'objet de deux parties distinctes. Dans la première, l'*Explosion*, l'auteur rappelle le développement des applications militaires, la mise au point des premières bombes A et H aux États-Unis, puis l'accession successive de quelques grandes puissances à l'armement nucléaire. Il fait ensuite un historique très fouillé des décisions nationales et des négociations internationales destinées d'abord à assurer le monopole des armements aux initiateurs, puis à en borner le développement : la limitation des essais nucléaires, les premières renonciations à l'arme, le traité de non prolifération, l'équilibre de la terreur, les négociations SALT I et SALT II, ...

Dans une deuxième partie, la *Combustion*, d'importance sensiblement égale à la première, on retrace l'histoire des espérances éveillées par l'atome civil, des premières piles, des premiers programmes nationaux, de la propulsion sous-marine et des exploits du Nautilus. Une bonne place est donnée ensuite aux rivalités internationales et à la création d'organismes internationaux de contrôle et de coopération, comme l'AIEA, Eurochimic, Euratom, Eurodif, ... Finalement vient l'exposé de l'essor industriel des quinze dernières années marqué par la compétition entre de trop nombreuses filières, la victoire de peu d'entre elles et la fin des monopoles, avec notamment l'accès de plusieurs grandes puissances à l'enrichissement de l'uranium. Pour terminer, l'auteur décrit la bataille du plutonium, la contestation du nucléaire et la relance donnée à l'énergie nucléaire par la crise des approvisionnements pétroliers malgré l'accident de Harrisburg, à la centrale de Three Mile Island, dont les conséquences furent d'ailleurs purement matérielles.

Par ailleurs, l'ensemble sensibilise le lecteur à la continuité de l'effort nucléaire français, matérialisé par la croissance et les succès du CEA, ainsi que les réalisations d'EDF. Malgré les difficultés initiales dans la coopération de ces deux organismes, malgré l'absence presque complète d'aides extérieures, notre pays s'est doté d'armes compétitives, de sous-marins nucléaires, de centrales nucléaires fiables dans plusieurs filières, d'usines d'enrichissement et de traitement du combustible. Il possède maintenant au surplus une avance incontestable dans le domaine des surrégénérateurs.

Somme toute, les conclusions de l'auteur sont assez encourageantes. Citons en quelques-unes. D'une part les progrès de la technologie ont abouti « à la réalisation des armes et des sous-marins les plus effroyables, mais aussi des centrales thermiques les plus puissantes et les plus économiques ». A moins de réaliser un changement radical, et étendu à toutes les nations, de notre type de société et en attendant la mise au point des énergies nouvelles, il convient de reconnaître que « la combustion nucléaire, contrôlée est seule disponible aujourd'hui pour combler l'angoissant déficit des ressources énergétiques classiques » et qu'« il n'y a pas d'énergie plus dangereuse pour la paix et la santé que l'absence d'énergie ».

Nous concluons aussi en reconnaissant la vanité de beaucoup de contestations internationales reposant

sur des bases qui s'évanouissent en quelques années, comme l'uranium du Haut-Katanga, et aussi la vanité fondée sur l'espoir de conserver longtemps un secret en matière scientifique et technologique : les Russes, les Français, les Chinois et probablement bien d'autres ont su le percer.

La lecture du *Complexe atomique*, de cette histoire « toujours fascinante et souvent déplaisante », comme le dit si bien Bertrand Goldschmidt, nous inspire d'autres réflexions. Ce sont d'abord les tragiques conséquences qu'a entraînées la coïncidence, à quelques mois près, de deux événements indépendants, la découverte de la fission des noyaux atomiques et le début de la dernière guerre mondiale, avec la bombe atomique, l'équilibre de la terreur et le rejet du nucléaire. En période de paix, on aurait développé d'abord les applications civiles et disposé du temps nécessaire pour réussir à mettre hors la loi les applications militaires, en profitant de l'énormité des investissements nécessaires et de l'impossibilité de les dissimuler. Au surplus, la guerre a écarté beaucoup de savants français d'un domaine où la découverte de la radioactivité artificielle et de caractéristiques essentielles de la fission aurait donné sur le plan international une bien meilleure position technique et économique à notre pays.

Louis NÉEL

Recherches arithmétiques

Ch. Fr. Gauss (de Brunswick) traduites par Poulet-Delisle. Librairie Scientifique et Technique A. Blanchard.

Les *Disquisitiones Arithmeticae*, publiées en 1801 par le jeune Gauss, sont l'un des ouvrages les plus célèbres et les plus importants de l'histoire de la théorie des nombres. Une traduction du latin en français en a été faite par Poulet-Delisle, professeur de Mathématiques au lycée d'Orléans (éditée en 1807 chez Courcier à Paris). Le livre que nous donne maintenant la Librairie Scientifique et Technique Albert Blanchard est la reproduction de cette édition française de 1807 ; un tirage antérieur, publié en 1853, était épuisé.

On peut dire que le livre de Gauss est le premier traité systématique de théorie des nombres. Les problèmes abordés sont dans la ligne de ceux des mathématiciens du dix-huitième siècle Euler, Lagrange et Legendre, mais une élaboration conceptuelle et théorique adéquate permet à Gauss d'approfondir ces problèmes d'une manière originale. Le cadre que nous donne Gauss est, pour l'essentiel, conservé de nos jours, même si d'importantes simplifications ont pu être

apportées pour certains résultats. Le livre est divisé en sept sections et 366 numéros; il comporte en outre trois tables numériques; en gros, les quatre premières sections donnent une exposition de résultats connus antérieurement dans le langage introduit par Gauss, tandis que les trois dernières comportent des résultats nouveaux. La cinquième section, qui traite de la théorie des formes quadratiques, occupe à elle seule plus de la moitié du livre. La première section (cinq pages) donne la définition des congruences et le calcul qui leur correspond; la deuxième section, intitulée « Des congruences du premier degré » (25 pages), contient des résultats élémentaires d'arithmétique comme la décomposition en facteurs premiers, la théorie des congruences de degré un, les propriétés de l'indicateur d'Euler (nombre des nombres premiers avec un nombre donné et plus petits que celui-ci), le lemme de Gauss sur les polynômes primitifs et le résultat de Lagrange selon lequel une congruence à une inconnue suivant un module premier n'a pas plus de solutions que son degré.

La troisième section (38 pages) établit le théorème de Fermat selon lequel $a^p \equiv a \pmod{p}$ lorsque p est premier; Gauss y donne ensuite la première démonstration complète de l'existence de racines primitives mod. p (générateurs du groupe multiplicatif de $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$, p nombre premier), le théorème de Wilson et l'existence de racines primitives mod. p^n pour p nombre premier impair. La quatrième section (49 pages) a déjà un caractère moins élémentaire: les entiers modulo un nombre premier p sont répartis en résidus quadratiques et non résidus quadratiques, selon qu'ils sont congrus ou non à un carré, et la célèbre loi de réciprocité quadratique, formulée par Legendre, y est démontrée pour la première fois; la démonstration — la première des quatre que Gauss a inventées — procède par une récurrence extrêmement compliquée, et elle est très dure à suivre.

La cinquième section (270 pages) reprend, à la suite de Lagrange, la théorie des formes quadratiques binaires, expressions du type $ax^2 + 2bxy + cy^2$ avec a, b, c entiers, que Gauss note (a, b, c) d'une manière abrégée. Gauss montre comment le problème de la représentation d'un entier par une forme donnée se ramène à la classification des formes à une substitution linéaire près (portant sur x et y). C'est ce problème de classification qui est résolu ensuite, d'abord pour les formes de déterminant $b^2 - ac$ négatif, puis pour celles de déterminant positif non carré ou carré (on dit maintenant discriminant au lieu de déterminant); dans chaque cas, on montre qu'il n'y a qu'un nombre fini de classes de formes de déterminant donné

en se ramenant à des formes réduites. Dans le cas d'un déterminant positif la recherche d'une transformation linéaire faisant passer d'une forme à une autre se ramène à l'équation de Pell-Fermat $t^2 - Du^2 = m^2$, qui est étudiée. Gauss aborde ensuite la classification des formes de déterminant donné D en genres, en montrant que le caractère quadratique d'un nombre représenté par une telle forme relativement aux diviseurs premiers de D (et éventuellement son reste mod. 4 ou mod. 8) est fixé; la combinaison de ces caractères définit un genre de formes quadratiques, de sorte que deux classes de formes qui représentent un même nombre donné sont contenues dans un même genre. Cette classification en genres a été réinterprétée par Hilbert, et on a montré (au vingtième siècle) qu'elle était équivalente à la classification sur le corps des rationnels. Le concept qui vient après est celui de composition des classes de formes quadratiques; cette loi multiplicative fait de l'ensemble des classes de déterminant donné un groupe commutatif. L'exposé de Gauss est assez compliqué et il mêle la théorie de la composition des formes à l'étude des genres (problème de l'existence des genres de caractères donnés); en passant, il donne une deuxième démonstration de la loi de réciprocité quadratique, et il analyse la démonstration incomplète de Legendre. Pour obtenir ses résultats, Gauss a besoin de passer par l'intermédiaire des formes quadratiques ternaires, dont il donne des éléments de théorie. Par la suite, Dirichlet a simplifié la théorie de la composition des formes et l'a rendue beaucoup plus compréhensible; on la traduit maintenant en termes d'idéaux des corps quadratiques.

La sixième section (41 pages) indique quelques applications: décomposition des fractions en éléments simples et expression décimale; calcul de racines carrées mod. m et représentations d'un entier par une forme quadratique donnée; décomposition d'un nombre en facteurs premiers. Enfin la septième section (61 pages) est consacrée à la division du cercle en n parties égales (n nombre premier impair), c'est-à-dire à l'étude de l'équation algébrique $x^n - 1 = 0$; Gauss en fait la « théorie de Galois » en exploitant le fait que son groupe est le groupe multiplicatif des entiers mod. n : il montre ainsi que l'équation est résoluble par les radicaux et que le polygone régulier à 17 côtés peut se construire avec la règle et le compas (il signale d'ailleurs que la théorie peut aussi s'appliquer à la division de la lemniscate, ce qu'Abel redécouvrit en 1827).

Ce livre, d'une richesse exceptionnelle, doit être lu par tous ceux que la théorie des nombres intéresse, malgré sa difficulté; de nombreux exemples numériques et des indications

historiques aident d'ailleurs la lecture. La recherche contemporaine peut encore y trouver des idées à exploiter, comme en témoigne A. Weil dans un travail de 1949 à propos du nombre de points d'une hypersurface monomiale sur un corps fini. La traduction est correcte, malgré de légères inadvertances; on peut regretter le nombre énorme des fautes d'impression, dont seule une petite part est relevée dans la liste d'errata placée en tête du livre.

Signalons pour terminer que la Librairie Blanchard vient aussi de rééditer la *Théorie de nombres* de Legendre et la *Théorie des nombres* de Lucas; son catalogue comprend d'ailleurs bien d'autres titres d'un grand intérêt pour l'Histoire des Mathématiques, comme Euclide, Archimède, Apollonius, Diophante, Newton, Lagrange (Mécanique analytique), Riemann, le tout traduit en français.

Christian HOUZEL

Zoologie

L'organisation sociale des Abeilles, J. B. Frey, adapté par B. Dumortier, 96 p.; *Principes et applications de l'écologie; 1-concepts de base*, B. Dussart, 64 p. Coll. « Thèmes Vuibert Université, Biologie », Paris, Vuibert éd., 1979.

Ces deux petits livres présentent les caractères qui font l'intérêt de la Collection, collection déjà présentée ici: ce sont des mises au point claires et complètes, bien à jour, de grands thèmes de la Biologie. S'ils sont parfaitement adaptés aux étudiants des Universités et des Classes préparatoires aux grandes Ecoles, bien des lecteurs moins spécialisés en tireront plaisir et profit.

B. Dumortier n'a pas seulement traduit l'excellente mise au point de J. B. Frey sur les Abeilles; il a eu l'idée originale d'y adjoindre d'abondantes citations, judicieusement choisies, d'auteurs anciens, à propos de chaque question abordée. Ainsi, nous pouvons comparer les idées de Plin l'Ancien (en fait de son traducteur, au XVI^e s.), de Swammerdam, de Réaumur, à nos connaissances actuelles sur la production du miel, sur les facteurs assurant l'unicité de la reine... Il y a là un effort pour intéresser les étudiants au domaine trop négligé de l'Histoire des méthodes et des idées en Biologie.

L'ouvrage comporte ainsi une quantité considérable d'information, soit classique (telle qu'elle résulte des travaux de von Frisch), soit actuelle (étude des phéromones, de l'essaimage, de l'équilibre des facteurs « anti-mâle » et « pro-mâle »...). Presque à tous les chapitres, nous

sommes confrontés au déterminisme de régulation (des récoltes, de la température, de la reproduction des divers types d'Abeilles...). A cet égard, l'étude de l'organisation sociale des Abeilles constitue donc bien, en dépit de l'étréouisse apparente du sujet, un chapitre important, donc un grand « thème » de la biologie générale.

Les concepts de base de l'écologie sont présentés par B. Dussart avec les mêmes qualités de clarté, de précision et d'incitation à la réflexion. Ces qualités apparaissent d'emblée à propos des définitions, qu'elles se rapportent à l'écologie elle-même ou aux grands concepts qu'elle utilise; notons le rapprochement, souvent par des tableaux, des conceptions des écologistes à propos de chaque terme (niche écologique, biotope, biocénose, écosystème, biome...). Bien des idées sont aussi à méditer dans les chapitres concernant le biotope (cycle de l'eau, l'air, le sol, cycles du carbone et de l'azote, transfert de l'énergie...); mais il conviendra de bien comprendre l'auteur quand il cite charbon et pétrole comme des « énergies non solaires » (auxquelles il semble ajouter le vent?). La dernière partie énumère les différents « acteurs » occupant la scène (le biotope), et aborde les notions de groupement, de préférendum et de niveau trophique. A chaque chapitre est adjointe une bibliographie qui permettra à l'étudiant d'en savoir plus à propos des nombreuses notions qui n'ont pu qu'être abordées dans ce fascicule, au reste introductif.

M. BOURÉRIAS

Cybernétique

Théorie des systèmes hiérarchiques à niveaux multiples, M. D. Mesarović, D. Macko, Y. Takahara. Traduit par J. Eugène, chargé de cours à l'EHESS. Préface de J. Lesourne. Economica, 1980.

Jacques Lesourne, Directeur du Laboratoire d'économétrie du Conservatoire National des Arts et Métiers, souligne, dans sa préface, l'intérêt que présente cette traduction pour tous ceux, « étudiants, enseignants, chercheurs, mathématiciens, automaticiens, ingénieurs, économistes et sociologues, intéressés par la théorie de l'organisation ».

La théorie proposée fournit, en effet, pour la première fois le moyen de traiter mathématiquement l'ensemble des concepts que l'on présente dans des traités tels que celui de J. G. March et H. A. Simon (*Les organisations*, Dunod, 1971). Un des auteurs, M. D. Mesarović, s'était fait connaître du public français par la publication, en collaboration avec

E. Pestel, du livre *Stratégie pour demain* (Seuil, 1974) constituant le second rapport du Club de Rome.

Si cette dernière étude doit beaucoup aux méthodes décrites dans la traduction que nous analysons ici, par contre elle n'en utilise qu'une petite partie. L'extension mondialiste ne se prête évidemment pas à l'application de la théorie de la coordination, partie la plus élaborée de l'ouvrage, faute de l'existence d'un coordinateur à ce niveau.

On a pu lire depuis, dans le numéro 22 (août 1979) de *Pour la Science* un article, intitulé *L'automatisation par l'intelligence répartie*, où les auteurs, qui ont travaillé sous la direction de M. D. Mesarović, montrent comment les micro-processeurs, actuellement disponibles, permettent une application efficace de ces méthodes à l'amélioration de la rentabilité de l'industrie de l'acier aux États-Unis. Cet article complète l'étude, donnée dans la *Théorie des systèmes hiérarchiques à niveaux multiples*, concernant cette même industrie.

Deux autres exemples figurent au début du livre : le système de répartition de la puissance électrique dans un ensemble puis les problèmes de décision qu'implique le fonctionnement en temps réel des industries pétrochimiques. Toutes ces applications montrent que la théorie proposée est particulièrement bien adaptée à l'étude des organisations complexes. Elle permet l'élaboration de modèles réels pouvant être traités sur ordinateur et ouvre la voie à des études de prévision prenant en compte un grand nombre de scénarios.

Cet ouvrage est une monographie sur un sujet nouveau; il expose les résultats des recherches des auteurs et présente une théorie, originale aussi bien par son contenu que par les développements mathématiques, dont le dessein est de permettre de mieux comprendre les systèmes décisionnels à niveaux multiples et par suite les structures du type organisation.

Informatique

L'ordinateur individuel, Yves Leclerc. Éditions l'Étincelle.

Le micro-ordinateur peut et doit « devenir un instrument au service de la liberté individuelle. » Il permet de réaliser, selon l'auteur, « la synthèse de ces deux objectifs en apparence irréconciliables : l'autonomie de l'individu et le fonctionnement ordonné de la société. »

Le monde contemporain a choisi l'informatique contre la liberté. Ceux qui ne peuvent s'y résoudre trouveront dans le travail d'Y. Leclerc une

folle raison d'espérer. L'auteur appelle à la Révolution contre une technocratie qui décide pour tous. Que faire? Apprendre à manier un micro-ordinateur. Aucune connaissance mathématique n'est requise, des manuels de programmation pour profanes (TRS-80, Apple II) permettant un apprentissage direct sur clavier.

Quelle libération pouvons-nous attendre des ordinateurs individuels? Pour l'instant aucune. Y. Leclerc rêve cependant au référendum électronique instantané à l'initiative des citoyens. A l'accès de chacun aux dossiers le concernant. A la protection des communications privées par un brouillage si complexe que les ordinateurs les plus puissants n'y pourront mais. La micro-informatique risque, c'est évident, la récupération par le Système : certaines grandes entreprises refusent aux acheteurs l'accès au langage-machine, les petites maisons (Apple, Ohio Scientific...) l'encouragent.

Avec le micro-processeur, la micro-informatique nourrit des ambitions moins politiques. Envahissant toutes les techniques, la puce de silicium est en passe de changer notre vie quotidienne. Elle prend en charge le contrôle du chauffage et de la climatisation ou l'allumage des nouveaux moteurs pour automobiles. Elle est à l'origine du boom des calculatrices et des jeux électroniques.

On met en place actuellement quatre cents micro-ordinateurs dans les lycées. Car il suffit d'adjoindre des périphériques aux micro-processeurs pour obtenir de véritables ordinateurs individuels, accessibles à partir de 6 000 F. S'ils ne peuvent guère pour l'instant servir qu'au jeu, d'autres utilisations se développent : simulation de situations réelles ou activités artistiques. Leur usage numérique ne dépasse pas encore celui d'une bonne calculatrice programmable. Et le logiciel purement domestique demeure encore fruste.

A l'avenir, les manipulations « sérieuses » l'emporteront probablement sur les activités ludiques. Les ordinateurs individuels subiront néanmoins la concurrence des micro-processeurs internes aux machines pour le contrôle des appareils domestiques. Mais ils ne connaîtront pas de rivaux pour l'éducation permanente à la maison. Leur plus belle réussite tiendra probablement à la prolifération des possibilités offertes à chacun d'entre nous pour communiquer avec nos semblables et accéder à toutes (?) les banques de données, bibliothèques, sonothèques, cinémathèques, musées.

Ne pensez pas que mon article tourne à la notice publicitaire. Reportez-vous au texte d'Y. Leclerc. Il vous apportera avec force détails les dernières nouvelles de demain.

Christian DELÔCHE

AUTEURS

Matthew MESELSON et Julian ROBINSON (La guerre chimique et le désarmement) sont engagés tous deux depuis longtemps dans la prévention de la guerre chimique et bactériologique. M. Meselson est professeur de sciences naturelles à l'Université Harvard. Outre ses importants travaux scientifiques dans le domaine de la génétique moléculaire, M. Meselson consacre depuis des années une grande partie de son temps et de son énergie à l'analyse des problèmes posés par le développement des armes chimiques et bactériologiques. On s'accorde généralement à reconnaître qu'il a joué un rôle capital dans les processus politiques qui ont amené la signature, en 1972, de la Convention sur les armes biologiques. J. Robinson, qui est chercheur en sciences politiques à l'Université du Sussex, est un spécialiste de la technologie militaire et du contrôle des armements. Avant d'entrer à l'Université du Sussex en 1971, il était directeur du projet de limitation des armements chimiques et biologiques à l'Institut International de Recherches sur la Paix de Stockholm.

Richard NAEYE (La mort subite du nourrisson) est président du Département de pathologie à la Faculté de médecine de l'Université d'État de Pennsylvanie. R. Naeye a concentré ses recherches sur les maladies du fœtus et du nouveau-né. « Je me suis particulièrement intéressé, écrit-il, aux facteurs de l'environnement qui sont responsables d'affections prénatales spécifiques, comme l'usage du tabac par la mère, la malnutrition, etc.

Francis van NOTEN, Daniel CAHEN et Lawrence KEELEY (Un campement paléolithique en Belgique) sont archéologues associés avec le Musée Royal de l'Afrique Centrale à Tervuren en Belgique. F. van Noten, qui est responsable de la Section Préhistoire-Archéologie de ce musée, enseigne également la paléo-ethnographie à l'Université catholique de Louvain. Il est diplômé de l'Université de Gand (il a obtenu son doctorat en 1967). Depuis qu'il a rejoint l'équipe du Musée Royal en 1965, F. van Noten a fait des recherches archéologiques aussi bien en Afrique qu'en Belgique. D. Cahen est responsable des « Etudes sur le terrain » au Musée Royal. Il a fait ses études à l'Université de Bruxelles : il a obtenu son doctorat en 1973. Avant d'occuper son poste actuel, il était chercheur à la Fondation Nationale belge pour la recherche scientifique et a

enseigné à l'Université du Zaïre et à l'Université du Gabon. L. Keeley, chercheur associé au Musée Royal, est également membre de la faculté de l'Université de l'Illinois à Chicago. L. Keeley est un spécialiste de l'analyse fonctionnelle des outils de pierre.

Marc BEKOFF et Michael WELLS (L'écologie sociale des coyotes) travaillent à l'Université du Colorado à Boulder. M. Bekoff enseigne à Boulder depuis 1974. Outre ses études sur les Canidés, aussi bien en captivité qu'à l'état sauvage, il a fait des recherches sur le comportement du Manchot Adélie. M. Wells est diplômé de l'Université d'État du Michigan et a obtenu une maîtrise et un doctorat à l'Université d'État du Colorado. Il étudie les coyotes depuis six ans.

Georges MATHE (Les nouvelles frontières de la recherche cancérologique) dirige, à l'Hôpital Paul-Brousse de Villejuif, le Service des maladies sanguines et tumorales de l'Assistance Publique, et, l'Institut de cancérologie et d'immunogénétique (Unité 50 de l'INSERM et Centre de l'Association Claude-Bernard). Il est professeur à l'Université de Paris-Sud. Il est connu du monde scientifique depuis qu'il a tenté avec succès les premières greffes de moelle osseuse sur les physiciens yougoslaves victimes d'un accident atomique en 1958, puis sur des patients leucémiques : après 20 ans pendant lesquels cette greffe ne fut l'objet que de rares essais dans le monde, étant donné ses très grandes difficultés de réalisation, elle connaît aujourd'hui un grand succès dans le traitement des insuffisances sanguines (ou aplasies) et de certaines leucémies lorsque les patients disposent de donneurs appropriés. Georges Mathé s'est lancé, dès le début de sa carrière de spécialiste des maladies sanguines et tumorales, dans le développement de leurs traitements médicaux : il a assisté à la naissance de la chimiothérapie qui utilise des médicaments empêchant les cellules de se multiplier, et il a été le premier à montrer l'action et l'intérêt de plusieurs d'entre eux. Il a d'abord, comme tous les hématologues et cancérologues, contribué à les utiliser dans les leucémies et maladies ganglionnaires apparentées ; il les a appliqués ensuite aux autres tumeurs lorsqu'elles sont avancées et disséminées. Puis il s'est intéressé aux quelques cellules tumorales, peu nombreuses certes mais déjà disséminées, que peut laisser un premier traitement d'une maladie tumorale quelconque. Ces cellules sont responsables des rechutes d'où l'essai de la prévention de ces rechutes par un traitement médical, donc général, appliqué après la chirurgie ou la radiothérapie, et qui peut être une chimiothérapie ou ce qu'il a appelé

une immunothérapie (stimulation des résistances naturelles que possèdent nos organismes à l'égard des cellules tumorales). Encore dans l'enfance, cette méthode thérapeutique connaît les heurts et malheurs de toutes les méthodes originales et les concepts sur lesquels elle est fondée subissent une évolution cyclique qu'il décrit dans son article. Tout en évoquant le rêve qu'on pourrait un jour contrôler la cancérisation en contrôlant les gènes de la cellule, il explique ses tentatives actuelles de prévention des tumeurs des fumeurs qu'il soumet à certains anticancérogènes dont l'action s'exerce au laboratoire sur des modèles proches de ceux que provoque le tabac chez l'homme.

Praveen CHAUDHARI, Bill GIESSEN et David TURNBULL (Les verres métalliques) travaillent tous trois dans le domaine des sciences des matériaux. P. Chaudhari fait partie de l'équipe du Centre de Recherches Thomas Watson de la Société IBM. Né en Inde, il fit des études supérieures à l'Institut de Technologie de Kharagpur où il obtint une licence de technologie en 1961. Il partit ensuite aux États-Unis pour poursuivre ses études ; il obtint son doctorat en sciences à l'Institut de Technologie du Massachusetts en 1966. Depuis cette date, il travaille à IBM. B. Giessen est professeur de chimie à l'Université de Northeastern où il est également directeur associé de l'Institut d'analyse chimique. Il a été chercheur associé en métallurgie au MIT de 1959 à 1968, date à laquelle il entra à la Faculté de Northeastern. D. Turnbull est professeur de physique appliquée à l'Université de Harvard.

Walter GILBERT et Lydia VILLAKOMAROFF (Des bactéries recombinantes pour fabriquer des protéines utiles) collaborent tous deux au développement des techniques de manipulation enzymatique des molécules d'ADN. W. Gilbert est professeur de biologie moléculaire à l'Université Harvard. Diplômé de Harvard, il a obtenu un doctorat de mathématiques à l'Université de Cambridge en 1957. W. Gilbert est l'un des fondateurs de *Biogen*, une société de génétique appliquée. L. Villa-Komaroff est professeur de microbiologie au Centre médical de l'Université du Massachusetts.

John BARROW et Joseph SILK (La structure primitive de l'Univers) sont tous deux astrophysiciens et s'intéressent tout particulièrement à la cosmologie. J. Barrow enseigne à l'Université d'Oxford. J. Silk est professeur d'astronomie à Berkeley. J. Silk est l'auteur d'un livre récent sur la cosmologie, *The Big Bang: The Creation and Evolution of the Universe*, publié par W.H. Freeman and Company.

BIBLIOGRAPHIE

LA GUERRE CHIMIQUE ET LE DÉSARMEMENT

- Frederic J. BROWN, *Chemical Warfare: A Study in Restraints*, Princeton University Press, 1968.
- Matthew S. MESELSON, *Chemical and Biological Weapons in Scientific American*, vol. 222, n° 5, pp. 15-25, mai 1970.
- The Problem of Chemical and Biological Warfare*, Stockholm International Peace Research Institute, Humanities Press, 1971-1975.
- Chemical Weapons and Chemical Arms Control*, sous la direction de Matthew Meselson, Carnegie Endowment for International Peace, 1978.
- Political Issues*, vol. 6, n° 2: *Chemical/Biological Warfare, a Selected Bibliography*, Center for the Study of Armament and Disarmament, California State University, 1979.

LA MORT SUBITE DU NOURRISSON

- Proceedings of the Francis E. Camps International Symposium on Sudden and Unexpected Deaths in Infancy*, sous la direction de Robert R. Robinson. Canadian Foundation for the Study of Infant Deaths, Toronto, 1974.
- Marie VALDES-DAPENA, *Sudden Unexplained Infant Death, 1970 through 1975: An Evolution in Understanding in Pathology Annual*, vol. 12, 1^{re} partie, pp. 117-145, 1977.
- Warren G. GUNTHEROTH, *Sudden Infant Death Syndrome (Crib Death) in American Heart Journal*, vol. 93, n° 6, pp. 784-793, juin 1977.

UN CAMPMENT PALÉOLITHIQUE EN BELGIQUE

- A. LEROI-GOURHAN et M. BREZILLON, *L'Habitation magdalénienne n° 1 de Pincevent près Montereau (Seine-et-Marne)* in *Gallia Préhistoire*, vol. 9, p. 263, 1966.
- A. LEROI-GOURHAN et M. BREZILLON, *Fouilles de Pincevent: Essai d'Analyse ethnographique d'un habitat magdalénien (La section 36)* in *Gallia Préhistoire*, Supplément 7, 1972.
- D. CAHEN, L. H. KEELEY et F. L. VAN NOTEN, *Stone Tools, Toolkits and Human Behavior in Prehistory in Current Anthropology*, vol. 20, n° 4, pp. 661-683, décembre 1979.

L'ÉCOLOGIE SOCIALE DES COYOTES

- L. David MECH, *The Wolf: The Ecology and Behavior of an Endangered Species*, American Museum of Natural History, Natural History Press, 1970.

- H. KRUK, *Feeding and Social Behavior of the Striped Hyena (Hyaena vulgaris) in East African Wildlife Journal*, vol. 14, pp. 91-111, 1976.
- Behavioral Ecology*, sous la direction de J. R. Krebs et N. B. Davies, Sinauer Associates, Inc., 1978.
- Coyotes: Biology, Behavior and Management*, sous la direction de Marc Bekoff, Academic Press, 1978.
- J. LAMPRECHT, *The Relationship Between Food Competition and Foraging Size Group in Some Larger Carnivores in Zeitschrift für Tierpsychologie*, vol. 46, pp. 337-343, 1978.

LES NOUVELLES FRONTIÈRES DE LA RECHERCHE CANCÉROLOGIQUE

- G. MATHE et L. OLSSON, *Systemic Active Immunotherapy is shifting from the Middle Age to a Renaissance Period. II. Experimental Models for Cancer Systemic Immunotherapy and Immunoprophylaxis in Cancer Immunol. Immunoth.*, 6, pp. 197-199, 1979.
- A. W. HAMBURGER, S. E. SALMON, M. B. KIM, J. M. TRENT, B. J. SOEHNEN, D. S. ALBERTS et H. J. SCHMIDT, *Direct Cloning of Human Ovarian Carcinoma Cells in Agar in Cancer Res.*, 38, pp. 3438-3444, 1978.
- Adjuvant Therapies and Markers of Post Surgical Minimal Residual Disease*, vol. I. *Markers and General Problems of Cancer Adjuvant Therapies*, vol. II. *Adjuvant Therapies of the Various Primary Tumors*, sous la direction de G. Bonadonna, G. Mathé et S. Salmon, Springer-Verlag, Heidelberg-New York, 1979.
- J. MENDECKI, E. FREDENTHAL et C. BOTSTEIN, *Microwave Induced Hyperthermia in Cancer Treatment Apparatus in Preliminary Results in Int. J. Radiol. Oncol. Biol. Physics*, 4, p. 1095, 1978.
- L. OLSSON, N. KIGER et G. MATHE, *Autoreactive Cells in Cancer Active Immunotherapy in Histocompatibility Antigens on Cancer Cells*, Wisconsin, 1979.
- P. McGRADY, *The DMSO Story: « Reforming » Instead of Killing Cancer Cells in Medical Tribune*, 20, n° 10, 1979.
- H. MAYER, W. BOLLAG, R. HAMI et R. RUEGG, *Retinoids, a New Class of Compounds with Prophylactic and Therapeutic Activities in Oncology and Dermatology in Experientia*, 34, p. 1105, 1978.
- J. RITZ, J. M. PESANDO, J. NOTIS-McCORNATY, H. LAZARUS et S. F. SCHLOSSMAN, *A Monoclonal Antibody to Human Acute Lymphoblastic Leukemia Antigen in Nature*, 283, pp. 583-585, 1980.

LES VERRES MÉTALLIQUES

- G. S. CARGILL III, *Structure of Metallic Alloy Glasses in Solid States Physics: Advances in Research and Application*, vol. 30, pp. 227-320, 1975.
- John J. GILMAN, *Metallic Glasses in Physics Today*, vol. 28, n° 5, pp. 46-53, mai 1975.
- P. CHAUDHARI et D. TURNBULL, *Structure and Properties of Metallic Glasses in Science*, vol. 199, n° 4324, pp. 11-21, 6 janvier 1978.

DES BACTÉRIES RECOMBINANTES POUR FABRIQUER DES PROTÉINES UTILES

- Lydia VILLA-KOMAROFF, Argiris EFTADIADIS, Stephanie BROOME, Peter LOMEDICO, Richard TIZARD, Stephen P. NABER, William L. CHICK et Walter GILBERT, *A Bacterial Clone Synthesizing Proinsulin in Proceedings of the Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 75, n° 8, pp. 3727-3731, août 1978.
- Shigekazu NAGATA, Hideharu TAIRA, Alan HALL, Lorraine JOHNSRUD, Michel STREULI, Josef ESCODI, Werner BOLL, Kari CANTELL et Charles WEISSMANN, *Synthesis in E. coli of a Polypeptide with Human Leukocyte Interferon Activity in Nature*, à paraître.

LA STRUCTURE PRIMITIVE DE L'UNIVERS

- D. W. SCIAMA, *Modern Cosmology*, Cambridge University Press, 1971.
- P. J. E. PEEBLES, *Physical Cosmology*, Princeton University Press, 1971.
- Steven WEINBERG, *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*, Basic Books, 1977.
- David N. SCHRAMM et Michael S. TURNER, *Particle Physics and Cosmology in Physics Today*, vol. 32, n° 9, pp. 42-48, septembre 1979.
- Joseph SILK, *The Big Bang*, W. H. Freeman and Company, 1980.

JEUX MATHÉMATIQUES

- Edward LOCKWOOD, *A Book of Curves*, Cambridge University Press, 1961.
- Milton H. SUSSMAN, *Maxwell's Ovals and the Refraction of Light in American Journal of Physics*, vol. 34, n° 5, pp. 416-418, mai 1966.

EXPÉRIENCES D'AMATEUR

- Raymond C. MOORE, Cecil LALICKER et Alfred FISCHER, *Invertebrate Fossils*, McGraw-Hill Book Company, 1952.
- Rhona M. BLACK, *The Elements of Paleontology*, Cambridge at the University Press, 1970.



Bernard LINDAUER, 21 ans

PRIX SCIENTIFIQUE PHILIPS POUR LES JEUNES

réalise un véhicule sur coussin d'air.

Le goût de la recherche scientifique, c'est comme la musique ou la peinture, il arrive qu'il tombe sans prévenir sur un membre d'une famille "honnête et sans histoire". C'est ce qui est arrivé à Bernard Lindauer, que rien ne prédisposait vraiment à s'élever un jour sur un véhicule à coussin d'air, dans un nuage de poussière et un bruit à réveiller tout le voisinage !

LE JURY

DU PRIX SCIENTIFIQUE PHILIPS POUR LES JEUNES

Le Prix est ouvert à toutes les disciplines dans la mesure où elles sont abordées avec un véritable esprit scientifique. Son jury, composé de grands Scientifiques, est une occasion de rencontres exceptionnelles pour les candidats.

Président :

Louis LEPRINCE-RINGUET,
de l'Institut.

Membres du Comité Scientifique :

Pierre AUGER, Jean-François DENISSE, Jean DORST, Jean FOURASTIER, Pierre-P. GRASSET, Jacques LIONS, Pierre LEpine, membres de l'Institut; Louis NEEL, de l'Institut, Prix Nobel; Rémy CHAUVIN, professeur à la Sorbonne; Hubert CURIEN, Président du C.N.E.S.; Claude GUILLEMIN, Directeur du Service Géologique National au B.R.G.M.

C'est là que tout se joue

A ce premier essai une hélice explose ! Mais il en faut plus pour le décourager. Bernard Lindauer suit une ligne droite comme un arbre de direction : bac scientifique, BTS, bureau d'études en construction mécanique, mémoire de fin d'études portant sur un véhicule à coussin d'air et, enfin, la décision de se présenter au Prix Scientifique Philips. Pour concourir, il met au point son invention et remporte un premier prix.

C'est peut-être là que tout se joue car alors, non seulement il dispose d'une somme lui permettant de terminer son prototype, mais surtout le Prix le fait connaître des spécialistes. Des Sociétés très importantes s'intéressent à son projet et prennent contact avec lui.

L'avenir ? Il est clair : remporter le Prix Scientifique Européen, terminer "ses obligations militaires" et, pourquoi pas, commercialiser son invention.

**Peut-être, vous aussi,
avez-vous réalisé
quelque chose ?**

DEMANDE DE DOCUMENTATION

à retourner au PRIX SCIENTIFIQUE PHILIPS POUR LES JEUNES
50, avenue Montaigne, 75380 PARIS CEDEX 08
ou par téléphone à Sylvie VAUTIER 256.88.00

Nom _____

Prénom _____

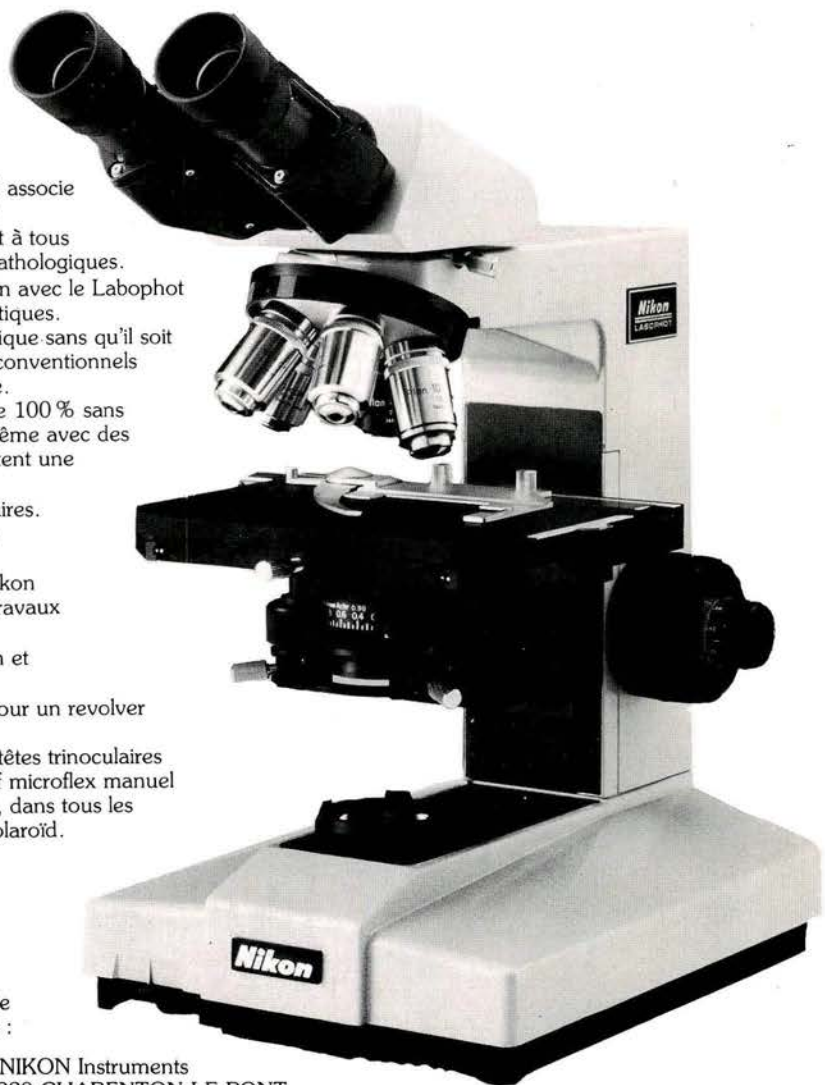
Âge _____

Adresse complète _____

Une conception nouvelle d'optiques, pour une nouvelle génération de microscopes

LABOPHOT NIKON

Le Labophot Nikon est un microscope de laboratoire et d'observation clinique. A l'exceptionnelle qualité de ses objectifs il associe une construction particulièrement rigide et robuste qui le destine tout particulièrement à tous les travaux cliniques ainsi qu'aux études pathologiques. L'innovation essentielle apportée par Nikon avec le Labophot réside dans la conception nouvelle des optiques. Elles suppriment toute aberration chromatique sans qu'il soit nécessaire, comme pour les microscopes conventionnels d'apporter une compensation sur l'oculaire. Elles procurent un champ d'observation de 100 % sans déformation ni coloration sur les bords, même avec des oculaires ultra grand champ. Elles permettent une observation et une prise photo précises des images les plus pointues et les plus claires. Elles assurent aux images un rendu fidèle des couleurs d'origine et sans halo. Les dispositifs modulaires du Labophot Nikon permettent à l'utilisateur d'effectuer tous travaux selon les techniques suivantes : fond clair, contraste de phase, polarisation et épifluorescence... La sélection du grossissement s'effectue pour un revolver 5 objectifs Nikon. Pour la prise de vue photographique, les têtes trinoculaires Labophot acceptent aussi bien le dispositif microflex manuel que le dispositif automatique HFM Nikon, dans tous les formats du 24 x 36 mm au 4 x 5 inch. polaroid.



Pour obtenir plus de renseignements sur le Labophot Nikon, écrivez ou téléphonez à :

Nikon Alain VARRIER - Division NIKON Instruments
16, rue de la Cerisaie - 94220 CHARENTON-LE-PONT
Tél. 375.97.55